

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

Emise PAU včetně benzo(a)pyrenu při spalování černého  
uhlí v domácích topeništích

Emissions of PAHs Including Benzo(a)pyrene During  
Combustion of Hard Coal in Households

Student:	Bc. Viktor Mrázek
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Výzkumné energetické centrum

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Viktor Mrázek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Emise PAU včetně benzo(a)pyrenu při spalování černého uhlí v domácnostech**  
**Emissions of PAHs Including Benzo(a)pyrene During Combustion of Hard Coal in Households**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Zdroje emisí PAU včetně benzo(a)pyrenu, vznik, nebezpečnost
- 2) Oficiální emisní bilance PAU a benzo(a)pyrenu v ČR a rešerše publikovaných měrných emisí (emisních faktorů) PAU včetně benzo(a)pyrenu z vytápění domácností tuhými palivy.
- 3) Metodika měření PAU včetně benzo(a)pyrenu v odpadním plynu ze spalovacích zařízení
- 4) Experimentální stanovení měrných emisí benzo(a)pyrenu při spalování černého uhlí v různých konstrukcích kotlů do 50kW (prohořivací, odhořivací, zplyňovací, automatický)
- 5) Výpočet alternativních bilancí emisí benzo(a)pyrenu z vytápění domácností v ČR pro případy různých variant dopadů tzv. „kotlíkových dotací“ (např. výměna 1/3 starých kotlů za nové)
- 6) Konstrukční výkres separátoru částic (impaktor).

Seznam doporučené odborné literatury:

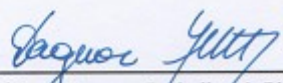
EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013  
MACHÁLEK P., MACHART J., Emisní bilance vytápění bytů malými zdroji od roku 2001, ČHMÚ 2003  
HORÁK J., MACHÁLEK P. a kol., Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory díl I. ISBN 978-80-248-1816-0, Ostrava 2008

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

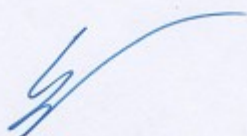
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Horák, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016

  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh  
vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce  
a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....10.5. 2016.....

.....*Mrázek*.....  
podpis studenta

### Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 10.5.2016...

.....  
Mrázek  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:	Bc. Viktor Mrázek
Adresa trvalého pobytu autora práce:	Josefovice 4, Klimkovice 742 83

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MRÁZEK, V. *Emise PAU včetně benzo(a)pyrenu při spalování černého uhlí v domácích topeništích: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2016, 67 s. Vedoucí práce: Horák, J.

Diplomová práce je zaměřena na stanovení emisí polycyklických aromatických uhlovodíků včetně benzo(a)pyrenu při spalování černého uhlí v domácích topeništích. V kapitolách 2 až 4 je popsána problematika emisí polycyklických aromatických uhlovodíků včetně benzo(a)pyrenu, jejich zdroje, nebezpečnost, metodika měření a používané emisní faktory. V kapitole 5 jsou na základě provedených experimentálních měření při spalování černého uhlí stanoveny měrné emise benzo(a)pyrenu pro různé konstrukce kotlů. V kapitole 6 jsou pro tři modelové případy vypočteny možné dopady tzv. Kotlíkových dotací na emise benzo(a)pyrenu.

## ANOTATION OF MASTER THESIS

MRÁZEK, V. *Emissions of PAHs Including Benzo(a)pyrene During Combustion of Hard Coal in Households: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2016, 67 p. Thesis head: Horak, J.

The Master Thesis is focused on determining the emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons, including benzo(a)pyrene, during a combustion of hard coal in households. The issue of emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons including benzo(a)pyrene, their sources, hazards, measurement methodology and used emission factors are described in Chapters 2-4. Specific emissions of benzo(a)pyrene for various boiler constructions are set in Chapter 5 based on the experimental measurement of the combustion of hard coal. Possible impacts of so-called "Kotlikove dotace" subsidy program on emissions of benzo(a)pyrene are calculated for three model cases in Chapter 6.

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat **Výzkumnému energetickému centru**, že mi umožnilo zpracovat téma této diplomové práce.

Zejména děkuji **Ing. Jiřímu Horákovi, Ph.D., Ing. Františku Hopanovi, Ph.D., Ing. Kamilu Krpcovi, Ph.D. a Zdeňku Kysučanovi** za vstřícný a trpělivý přístup a odbornou pomoc při konzultacích ohledně mé diplomové práce.

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Polycyklické aromatické uhlovodíky – PAU.....	2
2.1	Základní charakteristika.....	2
2.2	Použití .....	2
2.3	Zdroje emisí PAU .....	2
2.4	Nebezpečnost PAU .....	3
2.5	Dopady na životní prostředí.....	4
2.6	Dopady na zdraví člověka.....	4
2.7	Benzo(a)pyren.....	4
2.7.1	Vývoj koncentrací benzo(a)pyrenu v ovzduší během let 2006-2014 .....	6
2.7.2	Podíl jednotlivých sektorů na koncentraci benzo(a)pyrenu v roce 2013 ...	7
2.7.3	Znečištění ovzduší benzo(a)pyrenem v roce 2014 .....	8
2.8	Toxický ekvivalentní faktor .....	9
3	Emise PAU včetně benzo(a)pyrenu, emisní faktory .....	10
3.1	Bilance emisí v České republice .....	10
3.2	Podíl emisí z vytápění domácností na celkové produkci ČR.....	11
3.3	Stanovení emisních faktorů z malých zdrojů.....	12
3.4	Srovnání emisních faktorů z různých zdrojů pro polyaromatické uhlovodíky ...	12
3.5	Používané emisní faktory.....	14
4	Metodika měření PAU .....	16
4.1	Odběr vzorku.....	16
4.2	Metoda filtračně-kondenzační.....	16
4.3	Metoda zřed'ovací .....	17
4.4	Metoda s chlazenou sondou .....	18
5	Experimentální stanovení měrných emisí.....	19
5.1	Použité palivo.....	19
5.2	Odběrová místa .....	20
5.3	Odběr a analýza vzorku TZL a PAU .....	21
5.4	Prohořivací kotel Viadrus Hercules U26 .....	22

5.5	Odhořivací kotel Dakon DOR 32.....	24
5.6	Automatický kotel Benekov – Ling 25 .....	26
5.7	Zplyňovací kotel Atmos kombi AC25S .....	28
5.8	Porovnání získaných dat .....	30
5.9	Separátor částic – Impaktor.....	36
5.10	Přehled získaných dat z impaktoru .....	38
6	Výpočet alternativních bilancí emisí benzo(a)pyrenu z vytápění domácností tuhými palivy v ČR .....	41
6.1	Výpočet a odhad současných emisí benzo(a)pyrenu .....	41
6.2	Varianty možného dopadu kotlíkových dotací .....	47
7	Závěr .....	52
8	Seznam zdrojů.....	54
9	Seznam tabulek .....	56
10	Seznam obrázků .....	57
11	Seznam výkresových příloh .....	58



## Seznam zkratek

B(a)P	benzo(a)pyren
CO	oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
CU	černé uhlí
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká Republika
D50	aerodynamický průměr částice
EEA	European Enviroment Agency
HPLC-FLD	High Performance Liquid Chromatography with Postcolumn Fluorescence Detection
HU	hnědé uhlí
NO <sub>x</sub>	oxidy dusíku (noxy)
O <sub>2</sub>	kyslík
PAH	polyaromatic hydrocarbons
PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky
PM <sub>10</sub>	prachové částice o velikosti menší než 10 mikrometrů
POP	perzistentní organické polutanty
REZZO	Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší
SO <sub>2</sub>	oxid siřičitý
TEF	Toxicity Equivalency Factors (toxický ekvivalentní faktor)
TOC	Total Organic Carbon (celkový organický uhlík)
TZL	tuhé znečišťující látky
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VEC	Výzkumné energetické centrum
ZL	znečišťující látky

# 1 Úvod

Světová populace roste a současně stoupají i její požadavky a potřeby. Uspokojování potřeb lidí by se však mělo uskutečňovat ruku v ruce s ochranou klimatu a životního prostředí. Jednou z činností, kterými člověk životnímu prostředí velice škodí, jsou spalovací procesy.

Stále více států přistupuje k politice snižování emisí škodlivých plynů a ochraně ovzduší, což se odráží v jejich legislativě a v regulaci těžebního a energetického sektoru.

V tomto ohledu se pozornost zaměřovala hlavně na velké znečišťovatele a průmyslové podniky. Nedávné průzkumy však prokázaly, že vytápění domů tuhými palivy se na znečišťování ovzduší podílí mnohem větší měrou, než se původně předpokládalo. Proto se v posledních letech věnuje zdrojům znečišťování z lokálních topenišť stále větší pozornost.

Možných cest, jak **omezit vypouštění škodlivin do ovzduší**, je více.

Jednou z možností je **omezit používání fosilních paliv**. Například podporou fotovoltaických a větrných elektráren na střechách nebo podporou zateplování domů. Podle Státní energetické koncepce by měla závislost na fosilních palivech klesnout do roku 2040 na 56 procent. V současné době se však Česko z 80 procent bez fosilních paliv neobejde. Jedná se tedy o dlouhodobý proces a nedá se předpokládat, že by domácnosti přestaly v dohledné době tuhá paliva používat. Zvláště, když se mnoho domácností převážně z ekonomických důvodů k topení tuhými palivy vrací.

Další možnou cestou, jak omezit vypouštění škodlivin do ovzduší, je snaha, aby **spalování tuhých paliv probíhalo ekologičtěji** v moderních lokálních topeništích, která jsou k životnímu prostředí šetrnější.

Tato práce je zaměřena na stanovení emisí polycyklických aromatických uhlovodíků včetně benzo(a)pyrenu při spalování černého uhlí v domácích topeništích.

Cíle práce jsou následující:

- 1) Seznámit se s problematikou emisí polycyklických aromatických uhlovodíků včetně benzo(a)pyrenu, s jejich zdroji, metodikou měření a způsobem výpočtu měrných emisí.
- 2) Na základě provedených experimentálních měření při spalování černého uhlí v různých konstrukcích kotlů stanovit měrné emise benzo(a)pyrenu pro prohořivací, odhořivací, zplyňovací a automatické kotle.
- 3) Pro několik modelových případů vypočítat možné dopady tzv. Kotlíkových dotací na emise benzo(a)pyrenu.

## 2 Polycyklické aromatické uhlovodíky – PAU

Tato kapitola je zpracována z [1,2,3,4,5,6].

### 2.1 Základní charakteristika

Skupina polycyklických aromatických uhlovodíků PAU (nebo PAH z anglického polyaromatic hydrocarbons) představuje velmi širokou škálu různých látek, které vznikají převážně během nedokonalého spalování. Vyznačují se tím, že ve své molekule obsahují kondenzovaná aromatická jádra. Čisté sloučeniny jsou bílé nebo nažloutlé krystalické pevné látky. Jsou velmi málo rozpustné ve vodě, ale snadno se rozpouštějí v tucích a olejích. Do skupiny PAU náleží například následující látky: benzo(a)pyren, naftalen, acenaftýlen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, pyren, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten.

### 2.2 Použití

Polycyklické aromatické uhlovodíky se většinou cíleně nevyrábějí. Existují ovšem výjimky, které jsou spojené s laboratorním výzkumem a analýzou. Například mezi PAU patří i naftalen a antracen, které využití mají. PAU jako skupina látek obecně jsou však obsaženy v celé řadě běžných produktů dnešního průmyslu. Jsou to například: **asfalt, výrobky z černouhelného dehtu, motorová nafta a materiály používané při pokrývání střech a při stavbě silnic.**

### 2.3 Zdroje emisí PAU

PAU **vznikají při spalovacích procesech** jakýchkoli materiálů obsahujících uhlík v případě, že spalování není dokonalé. Jedná se o **spalování téměř všech druhů uhlíkatých paliv**. Všude tam, kde se vyskytují vysokovroucí ropné či uhelné produkty (dehty, asfalty) lze očekávat přítomnost polyaromatických uhlovodíků. Jako další zdroj emisí PAU je uváděna výroba hliníku.

Za **přírodní** zdroje emisí je možné považovat přirozené přírodní požáry a erupce sopek.

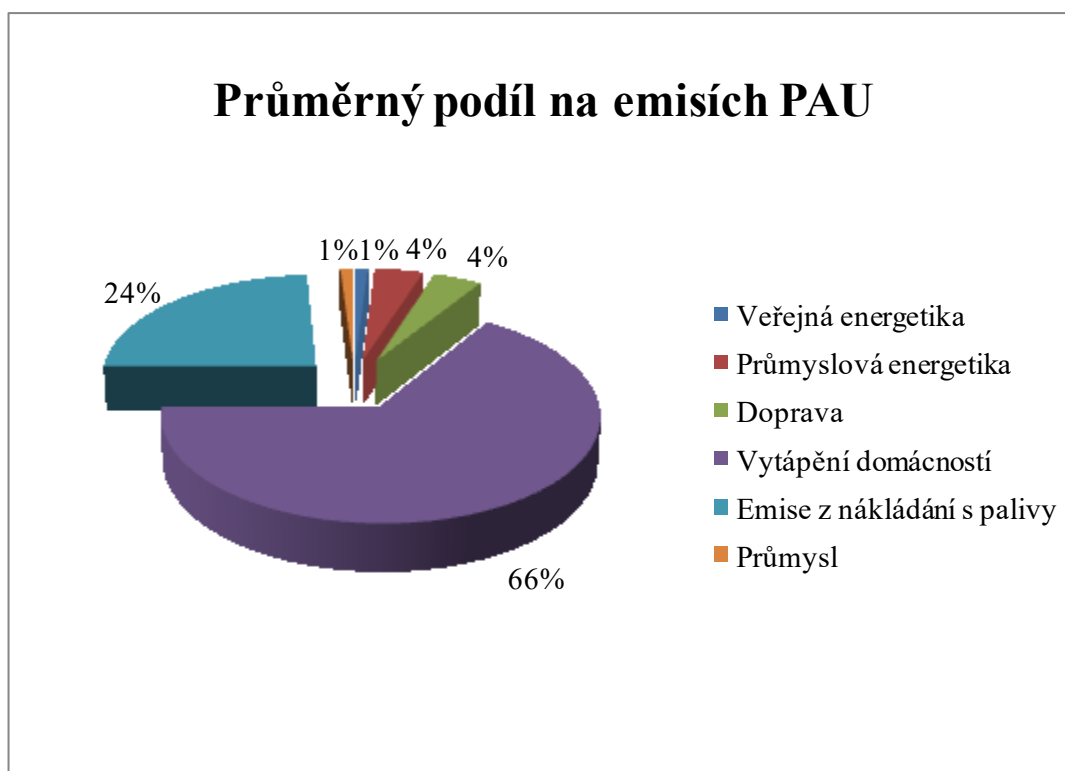
Mnohem větší podíl na emisích PAU však má lidská činnost.

**Mezi zdroje emisí způsobené lidskou činností můžeme zařadit zejména:**

- spalovací procesy (zejména vytápění domácností);
- koksárenství, rafinerie ropy, zplyňování a zkapalňování uhlí;
- výrobu hliníku;
- uvolňování z materiálu, které PAU obsahují – silnice, asfaltové izolace střech apod.
- emise naftalenu a antracenu v rámci jejich cíleného využití
- obecně procesy, kde dochází k nakládání s dehty, asfalty a dalšími vysokovroucími ropnými či uhelnými produkty.

Kromě toho se PAU vytvářejí a ukládají v potravinách a na potravinách při jejich výrobě nebo přípravě. Například při přímém sušení spaliny, při pečení, smažení a grilování. Také při kouření tabáku dochází ke vzniku PAU.

Na Obr. 2.1 je znázorněn průměrný podíl významných sektorů na emisích PAU. V posledních letech se bohužel ukazuje, že hlavním zdrojem těchto nebezpečných látek je vytápění domácností. A to především v těch oblastech, kde lidé opět topí tuhými palivy. Vytápění domácností produkuje zhruba 66% emisí PAU.



**Obr. 2.1:** Průměrný podíl významných sektorů na emisích PAU [3]

## 2.4 Nebezpečnost PAU

PAU jsou vysoce nebezpečné látky jak pro životní prostředí, tak i pro zdraví člověka. Jejich nebezpečnost je znásobena tím, že **jsou velmi stabilní**. Proto se mohou šířit do velkých vzdáleností a ohrožovat i odlehlá území Země.

**Jsou to látky:**

- Karcinogenní – schopné vyvolávat zhoubné rakovinné bujení
- Mutagenní – schopné vyvolat genetickou mutaci
- Teratogenní – schopné vyvolat vrozenou vývojovou úchylku vyvíjejícího se plodu

## 2.5 Dopady na životní prostředí

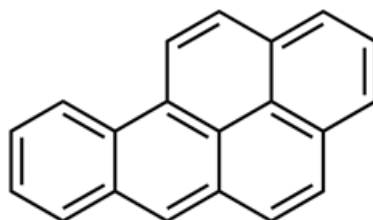
Pro velkou řadu živých organismů jsou PAU toxické. Mohou mít za následek poruchy reprodukce, rakovinu a mutace u zvířat. Závažným problémem proto je, že mohou ovlivňovat celé populace organismů. Nejproblémovější vlastností PAU je jejich **perzistence**. Je to **schopnost odolávat přirozeným rozkladným procesům**. Navíc se při spalovacích procesech mohou navázat na povrch sazí a prachových částic a tím jsou **schopné transportu atmosférou na velké vzdálenosti**. Stopy těchto látek byly proto zjištěny i na velmi odlehlých místech Země. PAU se také dokážou silně adsorbovat na sedimenty ve vodách.

## 2.6 Dopady na zdraví člověka

Pro člověka představuje celá řada látek ze skupiny polycyklických aromatických uhlovodíků závažné zdravotní riziko. PAU mohou mít nepříznivé účinky na kůži, krevetvorbu a reprodukci. Mohou způsobit poškození dýchacího a imunitního systému atd. **Jejich nebezpečí spočívá především v tom, že jsou karcinogenní a mohou ohrozit zdravý vývoj plodu.**

## 2.7 Benzo(a)pyren

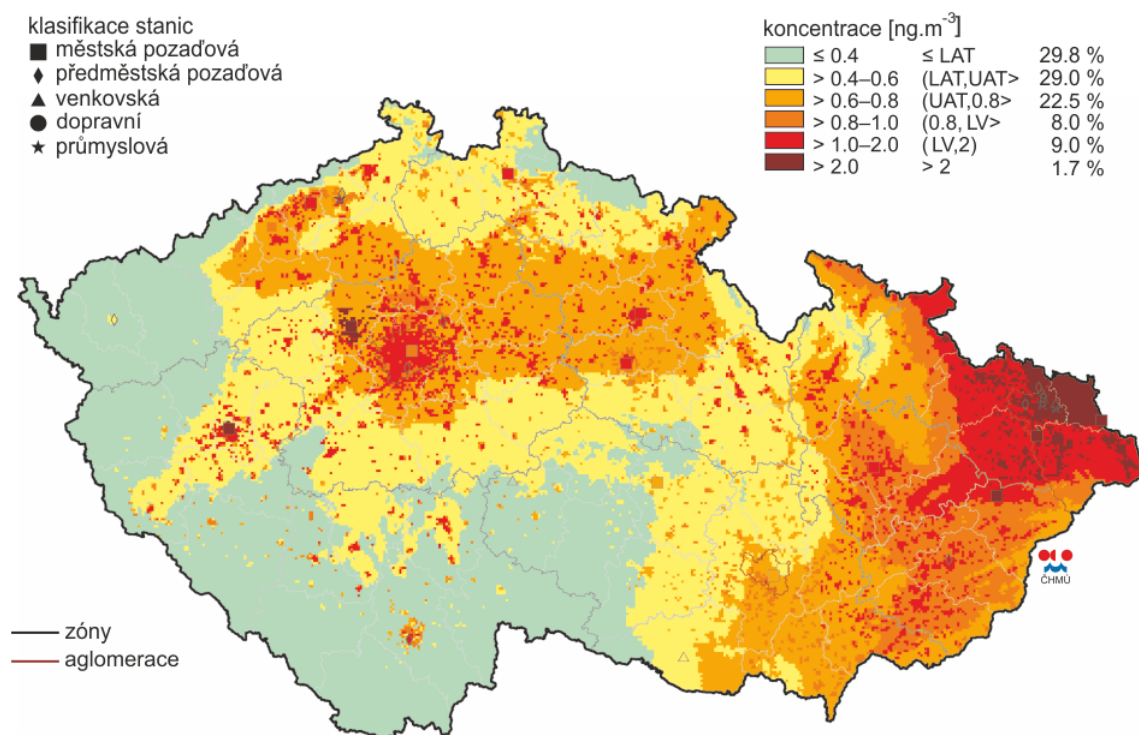
Benzo(a)pyren (sumární vzorec  $C_{20}H_{12}$ ) patří k nejsledovanějším organickým látkám znečišťujícím ovzduší. Je to polycyklický aromatický uhlovodík s pěti benzenovými kruhy. Produkují ho téměř výhradně spalovací procesy, při kterých nedochází k dostatečné oxidaci přítomných organických spalitelných látek. Vzniká tedy v průběhu nedokonalého spalování při teplotách 300 až 600 °C. Jako nejvýznamnější zdroje benzo(a)pyrenu se uvádí spalování pevných paliv (uhlí, dřevo) v domácích topeništích a doprava (výfukové plyny). Jeho určité množství vzniká i při spalování tabáku. Je silně karcinogenní a mutagenní a proto má velmi negativní dopady na zdraví lidí i dalších živých organismů.



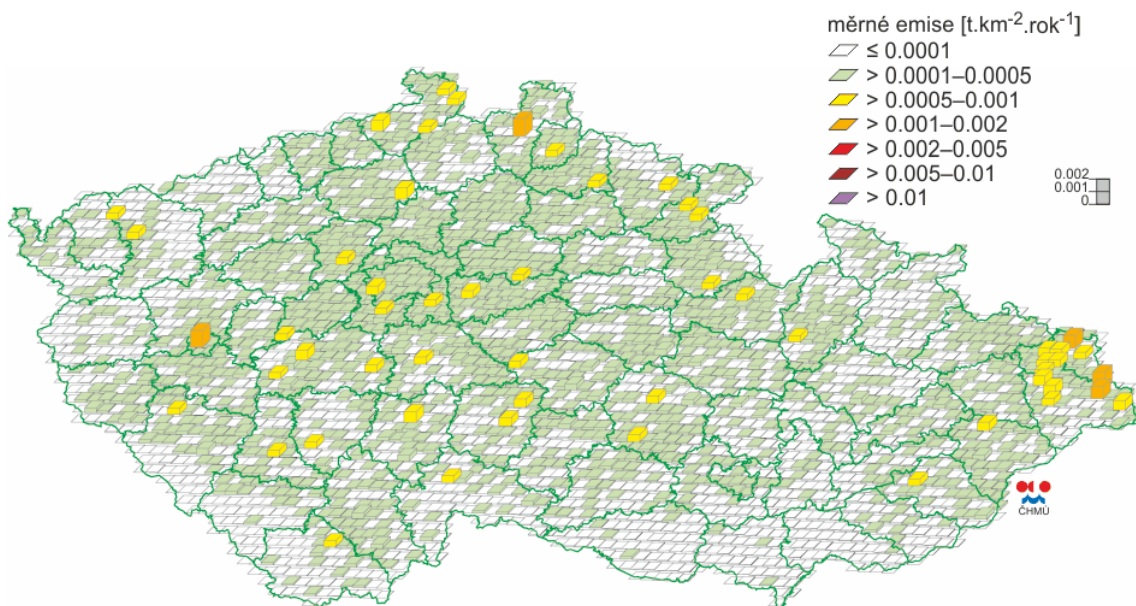
**Obr. 2.2:** Struktura molekuly [2]

Z následujících obrázků lze vyčíst, že povolené limity pro koncentraci benzo(a)pyrenu v ovzduší jsou v České republice v největší míře překračovány na Ostravsku. V severozápadních Čechách je nejhorší situace na Ústecku, Mostecku a Teplicku. V souvislosti s dopravou se lze s vysokými koncentracemi této látky setkat také ve všech velkých městech a dalších průmyslových oblastech ČR.

Na Obr. 2.3 jsou uvedeny průměrné koncentrace benzo(a)pyrenu v roce 2014. Na Obr. 2.4 je znázorněna emisní hustota, která se vztahuje na čtverec o velikosti 5x5 km v roce 2013.



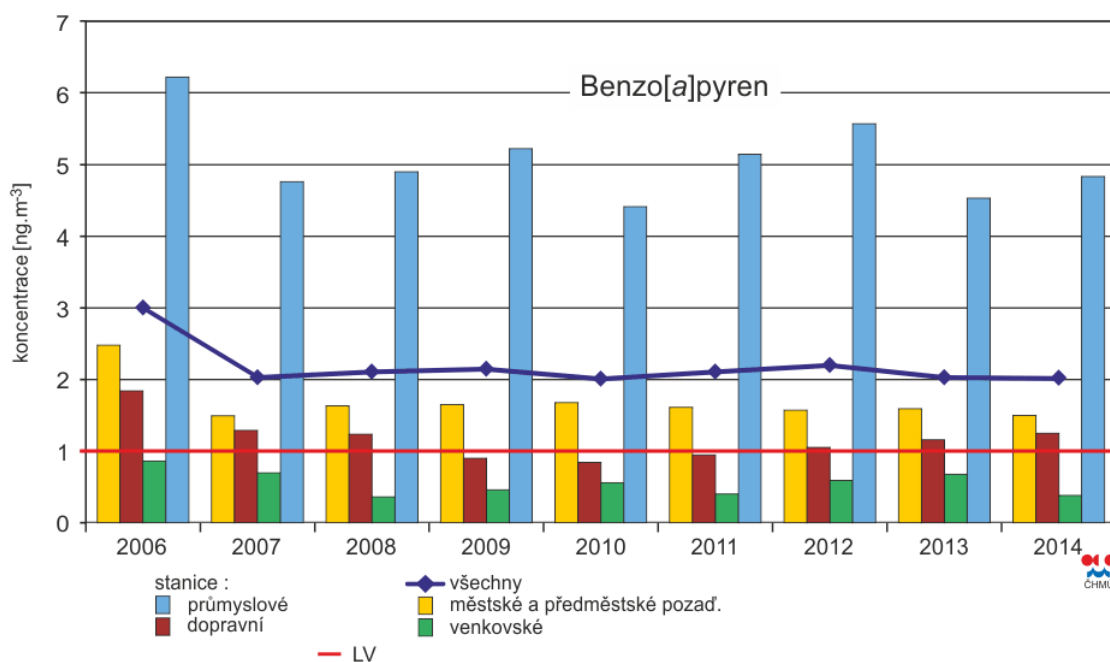
**Obr. 2.3:** Roční průměrná koncentrace benzo(a)pyrenu v roce 2014 [5]



**Obr. 2.4:** Emisní hustoty benzo(a)pyrenu ze čtverců 5x5 km v roce 2013 [5]

## 2.7.1 Vývoj koncentrací benzo(a)pyrenu v ovzduší během let 2006-2014

Na Obr. 2.5 je vidět, že v celorepublikovém měřítku je úroveň této škodliviny v ovzduší dlouhodobě nadlimitní. Jedná se přibližně o dvojnásobné překročení. V roce 2006 dokonce došlo v důsledku zhoršených meteorologických a rozptylových podmínek k více než trojnásobnému překročení hodnoty imisního limitu. Od roku 2007 koncentrace benzo(a)pyrenu mírně kolísají, avšak nevykazují výraznou tendenci k růstu nebo poklesu. Ve srovnání s rokem 2013 došlo v roce 2014 k mírnému poklesu koncentrací. Ten však úzce souvisel s meteorologickou situací během celého roku a ohledně zdrojů emisí nelze z tohoto poklesu vyvozovat žádné závěry.



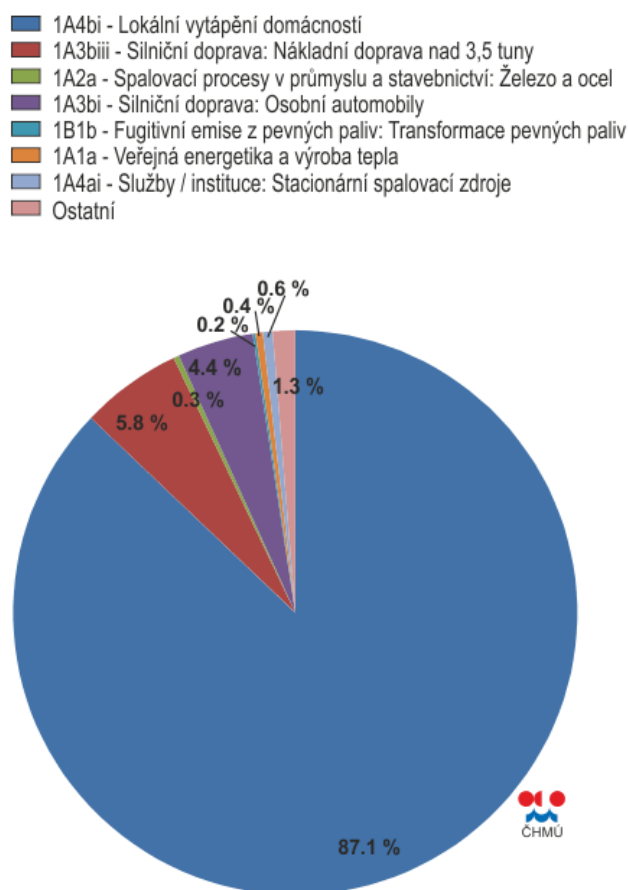
Poznámka:  
Není uvedeno znečištění v malých sídlech (málo měření). Lze předpokládat, že mnohde je nadlimitní.

**Obr. 2.5:** Trendy ročních charakteristik benzo(a)pyrenu v ČR [5]

### 2.7.2 Podíl jednotlivých sektorů na koncentraci benzo(a)pyrenu v roce 2013

Z Obr. 2.6 lze vyčíst, že největší podíl na celkových emisích benzo(a)pyrenu v roce 2013 mělo vytápění domácností a to 87,1%. Vliv nákladní a osobní dopravy byl 10,2%. Za ostatní významnější zdroje emisí lze označit spalovací procesy v průmyslu a stavebnictví.

Vysoké procento na celkových emisích benzo(a)pyrenu mělo vytápění domácností hlavně proto, že až 85% všech zařízení na spalování pevných paliv v domácnostech tvořily v té době kotle starších typů. Konkrétně odhořivací a prohořivací kotle.

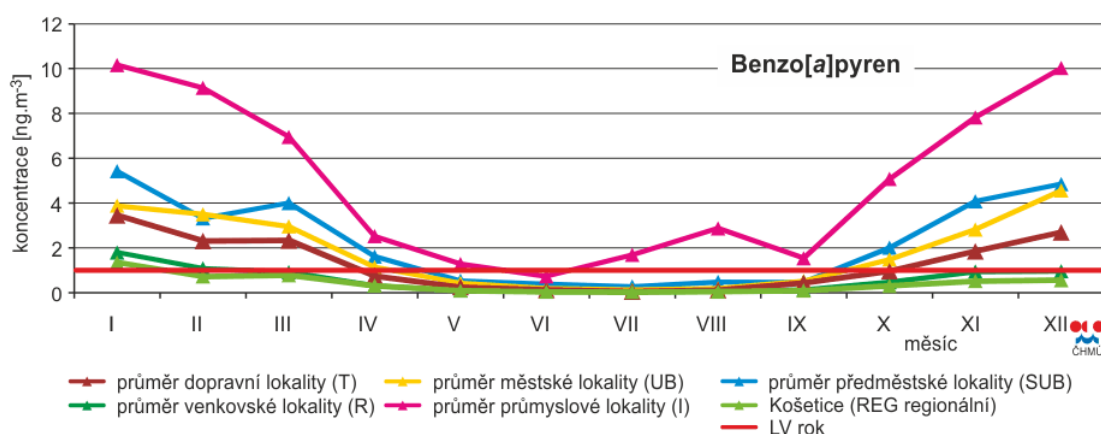


**Obr. 2.6:** Podíl jednotlivých sektorů na celkových emisích benzo(a)pyrenu v roce 2013 [5]



### 2.7.3 Znečištění ovzduší benzo(a)pyrenem v roce 2014

Koncentrace benzo(a)pyrenu vykazují v průběhu roku značné rozdíly. Na Obr. 2.7 je patrné, že v letním období dochází k poklesu koncentrací. To je způsobeno převážně následujícími faktory. Vyšší intenzita slunečního záření a vysoké teploty způsobují zvýšení chemického a fotochemického rozkladu PAU. V tomto období rovněž dochází ke zlepšení rozptylových podmínek. Nejvyšší podíl na snížení koncentrací benzo(a)pyrenu v ovzduší však v letních měsících jednoznačně představuje výrazný pokles emisí z lokálních topenišť. V zimních měsících naopak dochází k prudkému zhoršení kvality ovzduší převážně z následujících příčin. Při nižších teplotách se zhoršují rozptylové podmínky a fotochemický rozklad PAU. Významný podíl na emisích PAU má doprava, u které v zimním období dochází k navýšení emisí PAU v důsledku studených startů. Nejvýznamnějším zdrojem emisí benzo(a)pyrenu v ovzduší však jsou v zimním období prokazatelně lokální topeniště.



**Obr. 2.7:** Roční chod průměrných měsíčních koncentrací benzo(a)pyrenu [5]

Znečištění ovzduší benzo(a)pyrenem patří ke stěžejním problémům zajištění kvality ovzduší v ČR. V roce 2014 byly překročeny roční průměrné koncentrace benzo(a)pyrenu imisních limitů na více než 74 % stanic. To znamená na 23 z celkového počtu 31 stanic, kde proběhl dostatečný počet měření pro hodnocení.

Oproti roku 2013, kdy průměrná roční koncentrace dosáhla hodnoty  $2,10 \text{ ng.m}^{-3}$ , byla v roce 2014 koncentrace nižší a to  $1,98 \text{ ng.m}^{-3}$ .

Je odhadováno, že v roce 2014 bylo nadlimitní koncentraci benzo(a)pyrenu vystaveno 51,1% obyvatel. To představuje mírný pokles v porovnání s rokem 2013, kdy toto procento činilo přibližně 54,5%.

Je třeba si ovšem uvědomit, že nižší koncentrace oproti předcházejícím rokům byly v roce 2014 způsobeny zejména tím, že tento rok byl teplotně nadnormální. To bylo příčinou lepších rozptylových podmínek a menší intenzity vytápění.

Podobně jako v předešlých letech byla nejvyšší roční průměrná koncentrace v roce 2014 naměřena na průmyslové lokalitě Ostrava-Radvanice. Tato hodnota  $9,3 \text{ ng.m}^{-3}$  znamenala více než devítinásobné překročení imisního limitu.

Nejvyšší koncentrace benzo(a)pyrenu v ČR jsou každoročně naměřeny na stanicích Ostrava-Radvanice ZÚ, Ostrava Radvanice OZO, Ostrava-Přívoz, Český Těšín a Ostrava-Mariánské Hory. Dokonce i v letním období zde denní koncentrace benzo(a)pyrenu dosahují hodnot vyšších než  $1 \text{ ng.m}^{-3}$ . Přitom na jiných stanicích se v tomto období hodnoty pohybují kolem  $0,04 \text{ ng.m}^{-3}$ , což je mez detekce. To dokládá dlouhodobě nepříznivou situaci na Ostravsko-Karvinsku.

## 2.8 Toxický ekvivalentní faktor

Každá látka ze skupiny PAU má různou míru škodlivosti na životní prostředí a zdraví člověka. Proto byly vytvořeny hodnoty tzv. faktorů ekvivalentní toxicity (TEF) pro jednotlivé látky ze skupiny PAU. Jedná se o odhad relativní toxicity dané látky ve srovnání s benzo(a)pyrenem, který byl určen jako referenční základ. Pro získání hodnoty toxického ekvivalentu celkové směsi PAU je potřeba vynásobit koncentraci každé látky ze směsi faktorem TEF a získané hodnoty sečíst. Lze tedy určit, které z látek ve směsi jsou z hlediska toxicity významné a které jsou zanedbatelné.

V Tab. 2.1 jsou uvedeny faktory ekvivalentní toxicity stanovené agenturou pro ochranu životního prostředí US EPA (United States Environmental Protection Agency) pro čtyři nejsledovanější látky ze skupiny PAU.

PAU	TEF dle US EPA
benzo(a)pyren	1
benzo(b)fluoranten	0,1
benzo(k)fluoranten	0,1
indeno(1,2,3-cd)pyren	0,1

**Tab. 2.1:** Toxický ekvivalentní faktor [6]

Z Tab. 2.1 je zřejmé, že oproti benzo(a)pyrenu, který je považován za jednu z nejvíce nebezpečných látek ze skupiny PAU, mají ostatní tři sledované látky mnohem menší míru škodlivosti.

### 3 Emise PAU včetně benzo(a)pyrenu, emisní faktory

Tato kapitola je zpracována z [7,8,9,10,11,12,13].

Emisní faktory pro spalování tuhých paliv, které jsou dány legislativou, rozhodujícím způsobem ovlivňují používání těchto paliv v budoucnosti. Ovlivňují také použitelnost jednotlivých konstrukcí kotlů. Těmto skutečnostem se musí přizpůsobit výrobci kotlů, aby byli na trhu úspěšní. Metody, kterými se prokazuje dodržování stanovených limitů u jednotlivých zdrojů tepla, by měly být objektivní a nezpochybnitelné.

Stanovení emisního faktoru pro malá spalovací zařízení (cca do 50 kW) je ovlivněno řadou parametrů. Proto se jedná o komplikovaný problém.

#### 3.1 Bilance emisí v České republice

V České republice jsou zdroje emisí evidovány v tzv. „Registru emisí a zdrojů znečišťování ovzduší“ (REZZO).

Zákon o ochraně ovzduší zavedl v roce 2013 nové členění zdrojů znečišťování:

- **stacionární zdroje znečišťování ovzduší:**
  - *velké zdroje znečišťování REZZO 1*  
Jsou to zdroje o celkovém tepelném příkonu nad 0,3 MW.  
Emise se měří a ohlašují.
  - *střední zdroje znečišťování REZZO 2*  
Jsou to zdroje o celkovém tepelném příkonu nad 0,3 MW.  
Emise se vypočítávají z ohlášených spotřeb paliv a emisních faktorů.
  - *malé zdroje znečišťování REZZO 3*  
Jsou to zdroje o celkovém tepelném příkonu do 0,3 MW.
- **mobilní zdroje znečišťování ovzduší, označovány jako REZZO 4.**

**Měrná emise znečišťujících látek** je měřením stanovené množství produkováných emisí znečišťujících látek pro jeden konkrétní typ spalovacího zařízení a pro konkrétní typ paliva.

Je možné ji vyjadřovat jako množství emisí znečišťujících látek (ZL) například:

- na hmotnost paliva ( $\mu\text{g/kg}$ ,  $\text{mg/kg}$ ,  $\text{g/kg}$ ,  $\text{kg/kg}$ )
- na výhřevnost paliva ( $\mu\text{g/GJ}$ ,  $\text{mg/GJ}$ ,  $\text{g/GJ}$ ,  $\text{kg/GJ}$  nebo  $\mu\text{g/MJ}$ ,  $\text{mg/MJ}$ ,  $\text{g/MJ}$ ,  $\text{kg/MJ}$ )

**Emisní faktor znečišťujících látek** je stanoven jako vážený průměr z měrných emisí znečišťujících látek z více typů spalovacích zařízení pro konkrétní typ tuhého paliva. Například pro černé uhlí, hnědé uhlí, koks a biomasu. Používají se stejné jednotky jako u měrných emisí.

Skutečná hodnota emisního faktoru vykazuje značnou proměnlivost. Jeho hodnota závisí zejména na těchto základních faktorech:

- konstrukce spalovacího zařízení (konstrukce spalovací komory, rozvody spalovacích vzduchů, typ spalování nebo zplyňování, prohořívání, odhořívání),
- způsob přikládání paliva (dávkově, kontinuálně),
- provozní podmínky spalovacího zařízení (teplota ve spalovací komoře, regulace přívodu spalovacího vzduchu, kvalifikovanost obsluhy),
- vlastnosti paliva (granulometrie, vlhkost).

Z výše uvedených skutečností je zřejmé, že je velmi problematické stanovit jednu hodnotu emisního faktoru pro jedno palivo.

### 3.2 Podíl emisí z vytápění domácností na celkové produkci ČR

V roce 1991 byla přijata nová legislativa s cílem zlepšit kvalitu ovzduší v ČR. Tato opatření měla za následek snížení množství emisí vyprodukovaných velkými a středními zdroji znečištění. Malým zdrojům znečištění ale nevěnovala zásadní pozornost. Zpracované studie však ukázaly, že tyto malé zdroje znečištění (vytápění domácností tuhými palivy) mají významný podíl na celkovém znečištění ovzduší. Uvádí se, že lokální topeniště vyprodukují až 66% polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) a 35% primárních částic (PM<sub>10</sub>).

V letech 1993-1996 došlo k určitému zlepšení situace díky dotační politice státu, která podporovala výměnu fosilních paliv za zemní plyn. Dlouhodobý trend růstu ceny tohoto ekologického paliva však měl za následek, že se velké množství domácností vrátilo k používání levnějších tuhých paliv.

Snížení množství emisí vyprodukovaných v lokálních topeništích tak stále zůstává zásadním problémem při řešení problematiky zlepšování kvality ovzduší.

#### Kotlíkové dotace

Skutečnost, že se mnoho domácností vrátilo převážně z ekonomických důvodů zpět k vytápění tuhými palivy, bohužel často znamenala, že znovu došlo ke zprovoznění již dříve odstavených starých typů převážně prohořivacích a odhořivacích kotlů. Což je krok sice pochopitelný, ale z hlediska kvality ovzduší zcela nevhodný. Z tohoto důvodu vznikl program všeobecně nazývaný jako **Kotlíkové dotace**, který má podpořit a urychlit výměnu starých typů nevhodných kotlů za novější, ekologičtější.

Do roku 2020 chce stát na výměnu kotlů lidem přispět 9 miliard korun. To by mělo pomoci k výměně až 100 tisíc kotlů, což představuje zhruba třetinu nejvíce neekologických kotlů v zemi. V prvním kole výzvy má stát v plánu rozdělit 3 miliardy korun.

### 3.3 Stanovení emisních faktorů z malých zdrojů

Snaha optimálně stanovit emisní faktor PAU pro spalování tuhých paliv v malých zdrojích znečištění naráží na potřebu zohlednit mnoho různorodých skutečností:

- většinou se používá periodická přerušovaná doprava paliva a celý spalovací proces probíhá ve spalovacích periodách, spalovací proces je dynamický a nestabilní,
- nestabilní tlakové poměry v komínu (v závislosti na změně teploty spalin),
- proměnlivá spotřeba paliva a proměnlivé množství spalin během spalovací periody,
- proměnlivá koncentrace znečišťujících látek během spalovací periody,
- nízká rychlost spalin v komínu cca 0,5 až 2 m/s (problém s jejím stanovením a nastavením izokinetického odběru),
- omezená opakovatelnost spalovacích zkoušek (značná citlivost systému na vnější zásahy a změny podmínek),
- běžné provozní podmínky se značně liší od stavu, při kterém jsou testy prováděny v laboratořích,
- možnost vzniku POP (perzistentní organické látky) i za odběrovým místem v komíně (teplota spalin 200–500°C),
- různorodost typů spalovacích zařízení,
- různorodost druhů paliv.

Jak již bylo uvedeno, spalovací proces provází velká řada proměnlivých faktorů. Z toho vyplývá, že nastavení izokinetického odběru přímo v komíně je velmi obtížné a takový odběr není reprezentativní. Jednou z možných variant řešení je použití ředícího tunelu. Všechny spaliny z komína jsou pomocí digestoře umístěné nad komínem odsáty do potrubí, ve kterém jsou zchlazeny a naředěny okolním vzduchem. Tím se docílí mnohem příznivějších podmínek pro izokinetické vzorkování, než by byly přímo za kotlem.

### 3.4 Srovnání emisních faktorů z různých zdrojů pro polyaromatické uhlovodíky

Ve snaze zobjektivnit používané emisní faktory provedlo Výzkumné energetické centrum v Ostravě porovnání hodnot emisních faktorů (výsledky byly publikovány v roce 2011) z následujících zdrojů:

- emisní faktory Českého hydrometeorologického ústavu – ČHMÚ
- emisní faktory Evropské agentury pro životní prostředí (European Environment Agency) – EEA
- emisní faktory Výzkumného energetického centra – VEC

#### Emisní faktory ČHMÚ

Jednalo se o oficiálně platné emisní faktory pro ČR v době porovnávání.

### Emisní faktory EEA

Protože emisní faktory ČHMÚ jsou vztaženy na hmotnost paliva a emisní faktory EEA jsou vztaženy na výhřevnost paliva, bylo nutné pro potřeby porovnání emisní faktory EEA přepočítat. Pro přepočet byly použity průměrné výhřevnosti tuhých paliv v ČR v roce 2008 podle údajů ČHMÚ: hnědé uhlí 18,0 MJ/kg; černé uhlí 25,4 MJ/kg; dřevo 14,6 MJ/kg. Je třeba poznamenat, že EEA nestanovuje pro hnědé a černé uhlí samostatné emisní faktory, ale jen jeden souhrnný. Je to dáno tím, že v evropském měřítku je hnědé uhlí používáno pouze minimálně, zatímco v ČR tvoří jeho podíl při spalování v malých zdrojích až 90%.

### Emisní faktory VEC

Tyto emisní faktory již zohledňovaly nejen typ spalovaného paliva, ale také vliv spalovacího zařízení a to pěti základních typů: prohořivací, odhořivací, automatický, zplyňovací kotel a krbová kamna.

Výsledky srovnání emisních faktorů PAU uvádí Tab. 3.1. V současnosti je pro účely bilancí sledován výskyt čtyř polyaromatických uhlovodíků. Jsou to benzo(a)pyren, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten a indeno(1,2,3-c,d)pyren. V následující tabulce je proto uvedena suma těchto čtyř PAU.

Palivo	Emisní faktory [g/t]		
	ČHMÚ	EEA	VEC
Hnědé uhlí	3,63	14,4	19,6
Černé uhlí	6,15	20,4	20,0
Biomasa	8,58	10,2	3,4

**Tab. 3.1:** Porovnání emisních faktorů sumy 4 PAU z roku 2011 [11]

Z výsledků porovnání emisních faktorů uvedených v Tab. 3.1 vyplynuly následující skutečnosti. U černého uhlí se emisní faktor VEC blížil hodnotám emisního faktoru EEA, zatímco u ČHMÚ byl výrazně nižší. U hnědé uhlí se emisní faktory všech tří zdrojů odlišovaly, nejvyšší hodnotu dosáhl emisní faktor VEC. U biomasy byl emisní faktor VEC naopak nižší než u EEA a ČHMÚ.

Zjištěné rozdíly ve velikostech emisních faktorů ČHMÚ, EEA a VEC ukázaly, že by bylo potřeba používané emisní faktory zobjektivnit a aktualizovat, aby lépe odrážely skutečný stav.

Jak již bylo zmíněno, emisní faktory VEC již v té době zohledňovaly nejen typ spalovaného paliva, ale také vliv spalovacího zařízení. Ten má rozhodující vliv na množství emisí PAU. Z moderních typů spalovacích zařízení (automatické, zplyňovací) jsou výrazně nižší než emise ze starších typů zařízení (prohořivací a odhořivací kotle). Vliv typu spalovacího zařízení zobrazuje Tab. 3.2.

Typ zařízení	Měrné emise sumy 4 PAU [g/t]		
	Černé uhlí	Hnědé uhlí	Biomasa
Prohořivací kotel	22,5	31,3	5,14
Odhořivací kotel	19,3	6	2,78
Automatický kotel	0,0699	0,258	0,135
Zplyňovací kotel	-	-	0,498
Krbová kamna	-	-	0,151

**Tab. 3.2:** Vliv spalovacího zařízení na měrné emise sumy 4 PAU [11]

### 3.5 Používané emisní faktory

Dříve používané emisní faktory byly stanoveny pouze pro čtyři druhy tuhých paliv (hnědé uhlí, černé uhlí, koks a biomasa). Byly stanoveny v době, kdy se pro vytápění používaly převážně prohořivací a odhořivací kotle. Tyto emisní faktory nezohledňovaly fakt, že jeden typ paliva spálený v různých konstrukcích spalovacího zařízení vyprodukuje velmi rozdílné množství emisí. Postupné nahrazování starých kotlů za modernější, které produkují menší množství emisí, vyvolaly potřebu aktualizovat používané emisní faktory.

V roce 2013 proto VEC zveřejnilo Metodiku stanovení „váhy“ typu paliva a typu spalovacího zařízení pro výpočet emisních faktorů znečišťujících látek měrných emisí znečišťujících látek. Podle této metodiky se emisní faktor vypočte jako **vážený průměr** měrných emisí. Jako parametr důležitosti, tedy „váha“, zde slouží odhad zastoupení jednotlivých typů konstrukcí spalovacích zařízení na spotřebě paliva. Pomocí této metodiky byly vypočteny sady emisních faktorů, které následně ČHMÚ převzal jako oficiální.

Hodnoty dnes používaných emisních faktorů v ČR jsou uvedeny v Tab. 3.3.

Emisní faktory		Palivo		
		Hnědé uhlí	Černé uhlí	Biomasa
benzo(a)pyren	[mg/t]	3 577	7 118	1 447
benzo(b)fluoranten		1 344	4 921	1 057
benzo(k)fluoranten		1 522	3 102	635
indeno(1,2,3-c,d)pyren		1 408	4 203	991
<b>Suma 4 PAU</b>		<b>7 851</b>	<b>19 344</b>	<b>4 130</b>

**Tab. 3.3:** Emisní faktory ČHMÚ [12]

Hodnoty emisních faktorů stanovených Evropskou agenturou pro životní prostředí (EEA) a hodnoty přepočtených emisních faktorů pomocí průměrných výhřevnosti tuhých paliv jsou uvedeny v Tab. 3.4.

Emisní faktory		Palivo					
		Uhlí	Biomasa		Hnědé uhlí	Černé uhlí	Biomasa
benzo(a)pyren	[mg/GJ]	230	121	[mg/t]	4 140	5 842	1 767
benzo(b)fluoranten		330	111		5 940	8 382	1 621
benzo(k)fluoranten		130	42		2 340	3 302	613
indeno(1,2,3-c,d)pyren		110	71		1 980	2 794	1 037
<b>Suma 4 PAU</b>		<b>800</b>	<b>345</b>		<b>14 400</b>	<b>20 320</b>	<b>5 037</b>

**Tab. 3.4:** Emisní faktory EEA [13]

Při srovnání emisních faktorů ČHMÚ z roku 2011 v Tab. 3.1 a emisních faktorů ČHMÚ z roku 2013 v Tab. 3.3 je vidět, jak se emisní faktory postupně mění a aktualizují. A to v souladu s tím, jak se postupně daří jednotlivé skutečnosti ovlivňující spalovací procesy blíže prozkoumat, popsat a do emisních faktorů zapracovat.

Emisní faktor sumy 4 PAU se pro hnědé uhlí zvýšil z 3,63 g/t na 7,85 g/t. U černého uhlí došlo k výraznému zvýšení emisního faktoru a to z 6,15 g/t na 19,3 g/t. U biomasy naopak došlo ke snížení emisního faktoru z 8,58 g/t na 4,13 g/t.

Při srovnání současných emisních faktorů ČHMÚ v Tab. 3.3 a současných emisních faktorů EEA v Tab. 3.4 se nejvíce liší hodnota emisního faktoru sumy 4 PAU u hnědé uhlí (téměř dvojnásobně). Pro černé uhlí a biomasu jsou rozdíly v hodnotách malé.



## 4 Metodika měření PAU

Tato kapitola je zpracována z [14].

### 4.1 Odběr vzorku

Odběr vzorku plynu z potrubí se provádí izokineticky. Při izokinetickém odběru vzorků je třeba zajistit, aby vzduch proudící do odběrové hlavy měl stejnou rychlost a směr jako proud okolního vzduchu. Vzorkovací trati se zachycují PAU sorbované na pevných částicích a vyskytující se v plynné podobě. Podle druhu zvoleného vzorkovacího systému mohou být záchytnou částí tohoto systému filtry, kondenzační baňka a pevné nebo kapalné sorbenty.

Existují tři základní metody odběru vzorků:

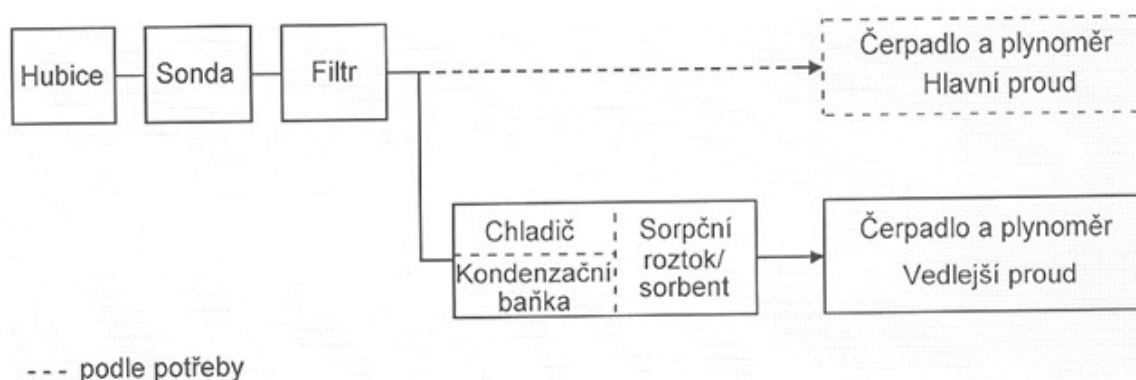
- Filtračně-kondenzační metodou
- Zředovací metodou
- Metodou s chlazenou sondou

Podle druhu vzorkovacího systému a podle formy výskytu PAU (zda se vyskytují v plynné formě nebo vázané na tuhé částice) se pak zvolí vhodná teplota jednotlivých částí vzorkovací trasy.

Způsob odebrání vzorku musí být popsán a zdůvodněn. Odběr vzorku musí být proveden podle EN 13284-1.

### 4.2 Metoda filtračně-kondenzační

Základní princip této metody je znázorněn na Obr. 4.1.



**Obr. 4.1:** Schematický náčrt vzorkovacího systému pro filtračně-kondenzační metodu [14]

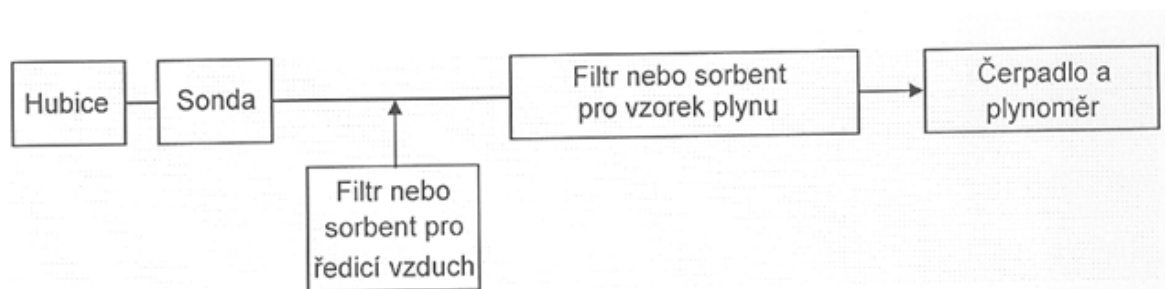
Podle potřeby může mít vzorkovací systém pro filtračně kondenzační metodu několik variant:

- **Varianta bez dělení toku**
- **Varianta s dělením toku** - za filtrem je zařazen dělič toku a hlavní proud s velkým průtokem pak slouží k nastavení izokinetického odběru vzorku. Vedlejší proud vzorku plynu odpovídá výše uvedenému uspořádání s chladičem a sorpční jednotkou
- **Varianta s pevným sorbentem před kondenzační baňkou** – sorbent bývá zařazen mezi chladič a kondenzační baňku

Teplota filtru musí být nižší než 125 °C, ale vyšší než teplota rosného bodu. Horní hranice teploty je stanovena na 125°C proto, aby se předešlo chemickým reakcím, které by mohly probíhat na aktivovaném povrchu. Pokud se předpokládá, že se ve vzorkovacím systému bude vyskytovat vyšší obsah prachu, lze stávající filtr chránit před zanesením přidáním dalšího filtru z křemenné vaty nebo cyklonem. Za filtrem je zařazen chladič. Ten ochlazuje vzorek plynu na teplotu nižší než 20 °C. Vyšší teplotu může mít vzorek plynu v případě, že se prokáže shoda získaných výsledků. Na pevných sorbentech nebo v absorbérech se zachytí PAU obsažené v plynné fázi nebo v aerosolových částicích.

### 4.3 Metoda zřed'ovací

Základní princip této metody je znázorněn na Obr. 4.2.



**Obr. 4.2:** Schematický náčrt vzorkovacího systému pro zřed'ovací metodu [14]

Vzorkovací systém pro zřed'ovací metodu může obsahovat:

- Manuální systém ředění
- Automatizovaný systém ředění

Vzorek plynu se odebírá pomocí vyhřívané sondy. Ve směšovacím kanálu se odpadní plyn rychle ochlazuje proudem vysušeného, filtrovaného a případně i chlazeného vzduchu na teplotu nižší než 40 °C. Vyšší teplotu může mít vzorek plynu v případě, že se prokáže shoda získaných výsledků. Tímto ředěním se zabráňuje tomu, aby relativní vlhkost vzorku plynu narostla na hodnotu blízkou 100%, kdy by mohlo docházet k nežádoucí kondenzaci. Po zředění se částice obsahující PAU zachycují na filtru. K zachycení plynných PAU se používají pevné sorbenty, které jsou umístěny za filtrem.

#### 4.4 Metoda s chlazenou sondou

Základní princip této metody je znázorněn na Obr. 4.3.



**Obr. 4.3:** Schematický náčrt vzorkovacího systému s chlazenou sondou [14]

Vzorek plynu prochází hubicí a sondou, která je chlazená vodou. V ní se vzorek ochlazuje na teplotu nižší než 20 °C. Vyšší teplotu může mít vzorek plynu v případě, že se prokáže shoda získaných výsledků. V kondenzační baňce se zachycuje kondenzát. Plynné PAU se zachycují v kapilárových či fritových absorbérech anebo pevných sorbentech, které jsou umístěny za kondenzační baňkou. Pro zachycení nejmenších částic aerosolu se před poslední absorbér nebo sorbent umísťuje filtr.

## 5 Experimentální stanovení měrných emisí

V této kapitole byly využity poznatky z [15,16].

Podmínky, které ovlivňují skutečnou hodnotu emisních faktorů, jsou velmi různorodé a proměnlivé. To vyvolává potřebu používané emisní faktory pravidelně aktualizovat tak, aby jejich hodnota co nejpřesněji odrážela skutečný stav.

V průběhu října 2015 byly ve zkušebně Výzkumného energetického centra provedeny spalovací zkoušky s polským uhlím. Celkem bylo realizováno 12 spalovacích zkoušek na čtyřech typech spalovacího zařízení – prohořivací, odhořivací, zplyňovací a automatický kotel. Na každém typu kotle byly provedeny 3 spalovací zkoušky pro zajištění dostatečného množství dat ke stanovení měrných emisí. Zkoušky byly provedeny při jmenovitém výkonu kotlů.

### 5.1 Použité palivo

Jako palivo byly použity dva druhy polského černého uhlí rozdílné granulometrie. Ořech 1 s granulometrií cca 20-50 mm a ořech 2 ekohrášek s granulometrií cca 7-25 mm. V laboratoři paliv VEC byl proveden rozbor obou paliv. Získané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5.1.

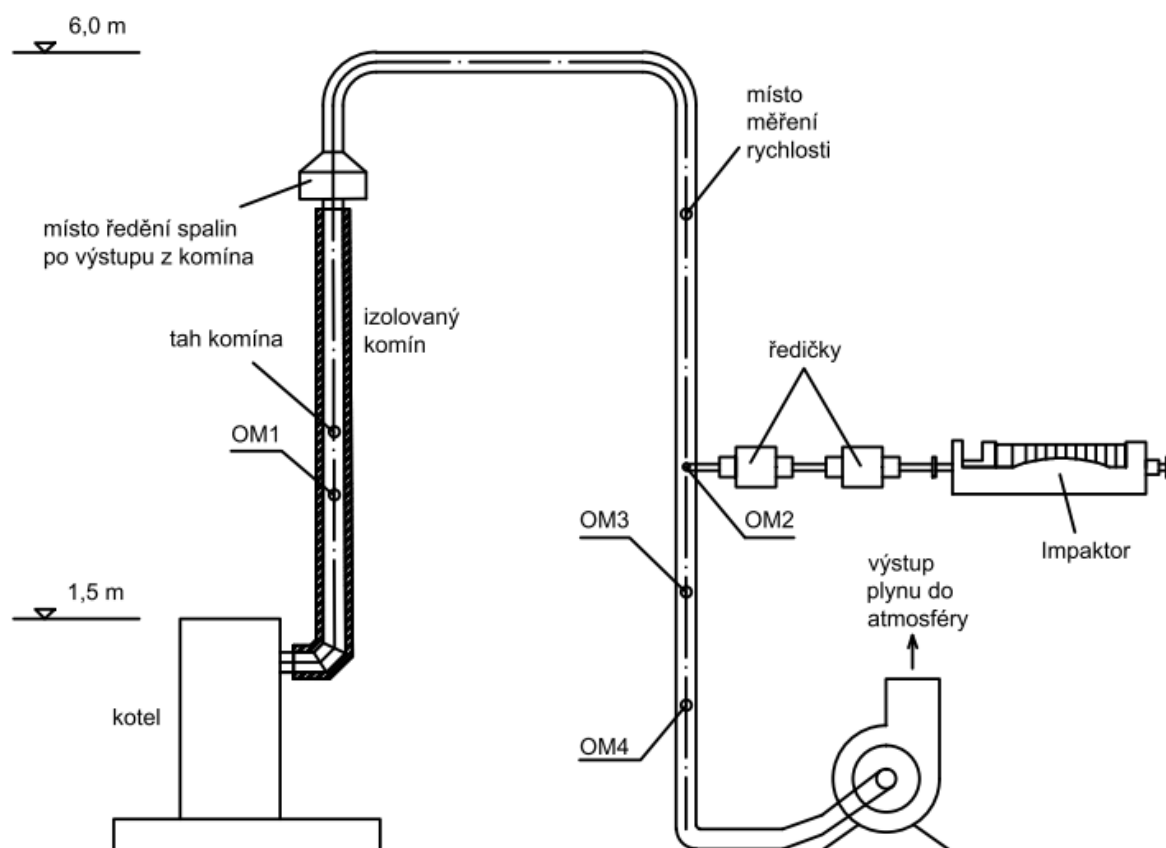
Rozbor paliva		CU ekohrášek	CU ořech 1
uhlík	[%hm]	62,08	71,29
vodík		4,12	4,88
dusík		1,01	1,39
kyslík		10,91	9,09
síra		0,99	0,59
voda veškerá		12,5	5,18
popel	[MJ/kg]	8,38	7,59
výhřevnost		23,97	28,12

**Tab. 5.1:** Rozbor použitých paliv

## 5.2 Odběrová místa

Testovací trať pro zkoušky kotlů byla složena z váhy, testovaného kotle, izolovaného komína, ředícího tunelu a spalínového ventilátoru.

Schéma odběrových míst a ředícího tunelu je uvedeno na Obr. 5.1.



**Obr. 5.1:** Schéma odběrových míst a ředícího tunelu

### Odběrové místo v komíně

OM1 - v tomto místě byly sledovány tyto složky spalín – CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, TOC

### Odběrová místa v ředícím tunelu

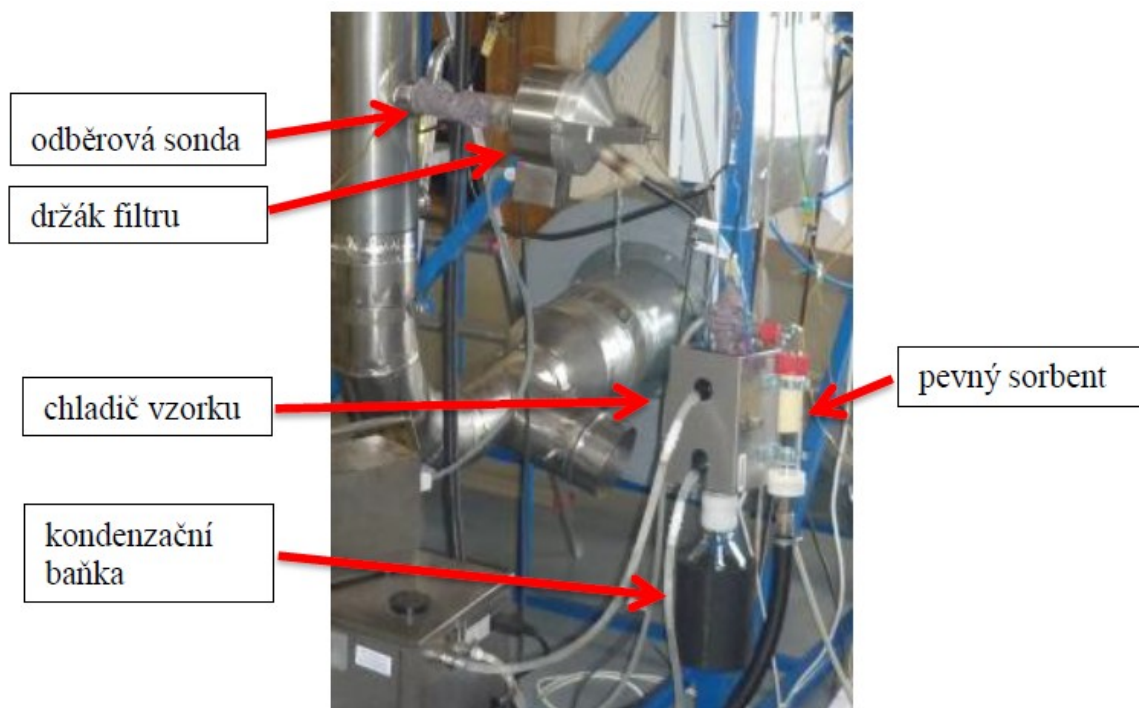
OM 2 – v tomto místě byl umístěn impaktor k separování jemných částic a PAU

OM 3 – v tomto místě byly sledovány tyto složky spalín – CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>

OM 4 – v tomto místě byly sledovány tyto složky spalín – prach, PAU

### 5.3 Odběr a analýza vzorku TZL a PAU

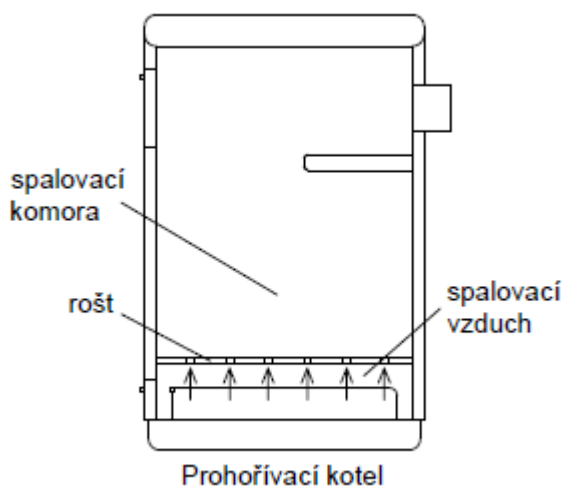
Vzorkování bylo provedeno použitím filtračně kondenzační metody. PAU byly stanoveny metodou HPLC-FLD. Fotografie odběrové aparatury je uvedena jako Obr. 5.2.



**Obr. 5.2:** Odběrová aparatura PAU [15]

## 5.4 Prohořivací kotel Viadrus Hercules U26

V prohořivacích kotlích hoří celá dávka paliva najednou na roštu ve spalovací komoře. Spaliny procházejí celou vrstvou paliva. Jedná se o nejstarší typ kotlů, které byly vyrobeny většinou z litiny. Jejich dostupná cena a dlouhá životnost mají za následek, že stále patří mezi nejpoužívanější kotle, přestože je jejich provoz kvůli dehtování a vysokému CO dost nekvalitní. Schéma prohořivacího kotle je uvedeno na Obr. 5.3.



**Obr. 5.3:** Schéma prohořivacího kotle



**Obr. 5.4:** kotel Viadrus Hercules U26

Při spalovací zkoušce byl použit prohořivací kotel Viadrus Hercules U26 (Obr. 5.3):

- jmenovitý výkon - 22,5 až 30 kW podle typu paliva
- předepsané palivo - koks s výhřevností 26 až 30 MJ/kg (vlhkost max. 15%)
  - černé uhlí s výhřevností 26 až 28 MJ/kg (vlhkost max. 15%)
  - dřevo s výhřevností 14 až 18 MJ/kg (vlhkost max. 20%)

Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí PAU jsou uvedeny v Tab. 5.2.

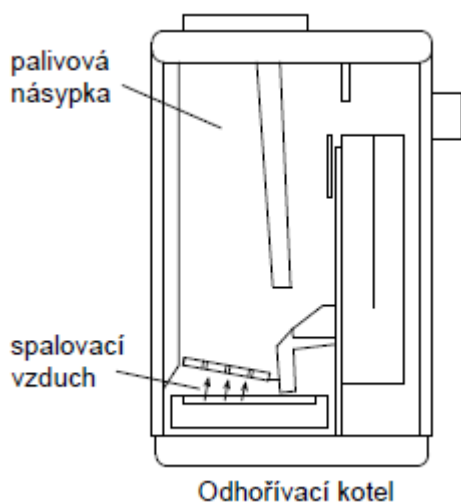
Číslo zkoušky			10	11	12	průměr 10 až 12
Kotel			VIADRUS U26	VIADRUS U26	VIADRUS U26	VIADRUS U26
Účinnost kotle (nepřímá metoda)		%	70,3	67,7	67,8	
Palivo			ČU	ČU	ČU	ČU
Výhřevnost paliva		GJ/t	28,12	28,12	28,12	
Datum měření		dd.mm.rrrr	26.10.2015	27.10.2015	28.10.2015	
Čas počátku měření		hh:mm	9:16	8:46	8:24	
Čas konce měření		hh:mm	13:16	12:50	12:27	
Průtok suchých spalín při referenčním kyslíku na hmotnost paliva		m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg <sub>pal</sub>	13,66	13,66	13,66	
Referenční kyslík		% obj.	10	10	10	
Měrné emise na výhřevnost paliva	benzo(a)pyren	mg/GJ	431	413	275	373
	benzo(b)fluoranten	mg/GJ	443	419	292	384
	benzo(k)fluoranten	mg/GJ	106	130	97	111
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/GJ	342	393	202	312
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/GJ	<b>1 322</b>	<b>1 355</b>	<b>865</b>	<b>1 181</b>
Měrné emise na hmotnost paliva	benzo(a)pyren	mg/t	12 133	11 612	7 728	10 491
	benzo(b)fluoranten	mg/t	12 443	11 775	8 197	10 805
	benzo(k)fluoranten	mg/t	2 989	3 647	2 739	3 125
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/t	9 615	11 062	5 670	8 782
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/t	<b>37 180</b>	<b>38 097</b>	<b>24 335</b>	<b>33 204</b>
Procentuální rozložení	benzo(a)pyren	%	33	30	32	32
	benzo(b)fluoranten	%	33	31	34	33
	benzo(k)fluoranten	%	8	10	11	10
	indeno(1,2,3-cd)pyren	%	26	29	23	26
	<b>Suma 4 PAU</b>	%	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Toxický ekvivalent směsi		mg/t	<b>14 637</b>	<b>14 261</b>	<b>9 389</b>	<b>12 762</b>

**Tab. 5.2:** Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Viadrus Hercules U26



## 5.5 Odhořivací kotel Dakon DOR 32

V odhořivacích kotlích se palivo přikládá do palivové šachty a hlavní část spalování probíhá až ve spalovací komoře, takže spaliny neprocházejí celou vrstvou přiloženého paliva. Během provozu dochází k postupnému sesouvání paliva z palivové šachty do prostoru spalovací komory. Schéma prohřivacího kotle je uvedeno na Obr. 5.5.



**Obr. 5.5:** Schéma odhořivacího kotle



**Obr. 5.6:** kotel Dakon DOR 32

Při spalovací zkoušce byl použit odhořivací kotel kotel Dakon DOR 32 (Obr. 5.5):

- jmenovitý výkon - 32 kW
- předepsané palivo – hnědé uhlí ořech 1 (20 až 40 mm) s výhřevností 16MJ/kg, obsah vody do 28%

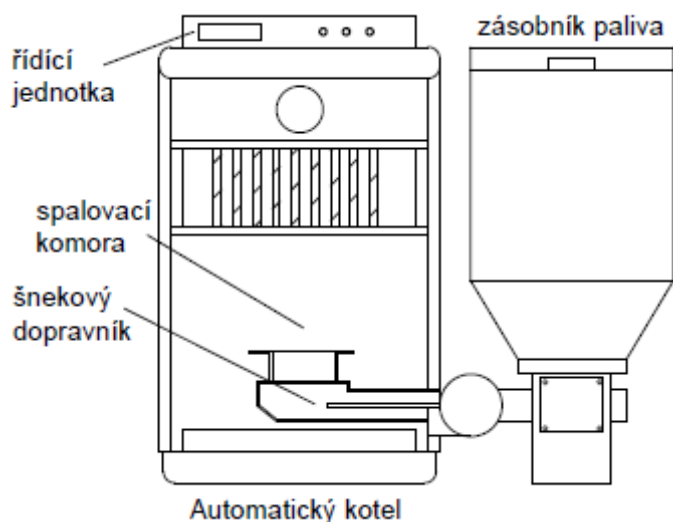
Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí PAU jsou uvedeny v Tab. 5.3.

Číslo zkoušky			7	8	9	průměr 7 až 9
Kotel			DAKON DOR32	DAKON DOR32	DAKON DOR32	DAKON DOR32
Účinnost kotle (nepřímá metoda)		%	76,3	74,9	74,8	
Palivo			ČU	ČU	ČU	ČU
Výhřevnost paliva		GJ/t	28,12	28,12	28,12	
Datum měření		dd.mm.rrrr	20.10.2015	21.10.2015	22.10.2015	
Čas počátku měření		hh:mm	9:20	8:44	9:05	
Čas konce měření		hh:mm	14:16	13:25	13:28	
Průtok suchých spalín při referenčním kyslíku na hmotnost paliva		m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg <sub>pal</sub>	13,66	13,66	13,66	
Referenční kyslík		% obj.	10	10	10	
Měrné emise na výhřevnost paliva	benzo(a)pyren	mg/GJ	12	30	44	29
	benzo(b)fluoranten	mg/GJ	19	38	53	37
	benzo(k)fluoranten	mg/GJ	16	35	48	33
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/GJ	11	29	44	28
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/GJ	<b>58</b>	<b>132</b>	<b>188</b>	<b>126</b>
Měrné emise na hmotnost paliva	benzo(a)pyren	mg/t	341	852	1 233	809
	benzo(b)fluoranten	mg/t	522	1 080	1 491	1 031
	benzo(k)fluoranten	mg/t	458	972	1 342	924
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/t	298	804	1 233	779
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/t	<b>1 618</b>	<b>3 709</b>	<b>5 299</b>	<b>3 542</b>
Procentuální rozložení	benzo(a)pyren	%	21	23	23	22
	benzo(b)fluoranten	%	32	29	28	30
	benzo(k)fluoranten	%	28	26	25	27
	indeno(1,2,3-cd)pyren	%	18	22	23	21
	<b>Suma 4 PAU</b>	%	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Toxický ekvivalent směsi		mg/t	<b>468</b>	<b>1 138</b>	<b>1 640</b>	<b>1 082</b>

**Tab. 5.3:** Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Dakon DOR32

## 5.6 Automatický kotel Benekov – Ling 25

U automatických kotlů je zásobník paliva buď součástí kotle, nebo je řešen jako externí zásobník. Jeho objem je výrazně větší než u ostatních kotlů. Palivo je ze zásobníku dopravováno šnekovým podavačem do hořáku ve spalovací komoře, ve které hoří jen malé množství paliva. U automatických kotlů je spalovací proces řízen nejlépe. Jednak regulací dávkování paliva šnekem, tak i pomocí regulace výkonu spalínového ventilátoru. Schéma automatického kotle je uvedeno na Obr. 5.7.



**Obr. 5.7:** Schéma automatického kotle

**Obr. 5.8:** kotel Benekov – Ling 25

Při spalovací zkoušce byl použit automatický kotel Benekov – Ling 25 (Obr. 5.7):

- jmenovitý výkon - 25 kW
- předepsané palivo - černé uhlí (krupice praná, hrášek praný) s výhřevností 21 až 23 MJ/kg
  - hnědé uhlí (ořech 2 a 3) s výhřevností 17 až 18,5 MJ/kg
  - dřevní pelety (8 až 20 mm) s výhřevností 15 až 19 MJ/kg

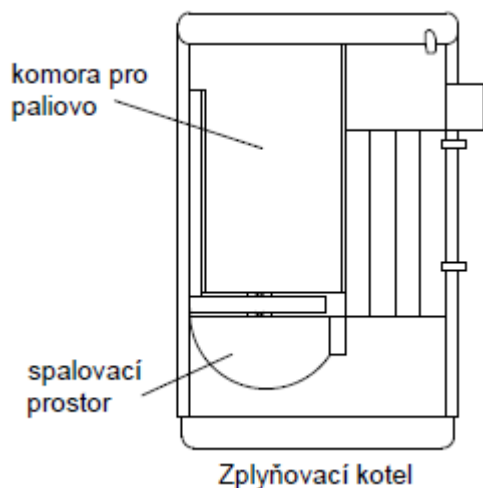
Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí PAU jsou uvedeny v Tab. 5.4.

Číslo zkoušky			1	2	3	průměr 1 až 3
Kotel			LING 25	LING 25	LING 25	LING 25
Účinnost kotle (nepřímá metoda)		%	82,8	81,7	81,4	
Palivo			ČU	ČU	ČU	ČU
Výhřevnost paliva		GJ/t	23,97	23,97	23,97	
Datum měření		dd.mm.rrrr	06.10.2015	07.10.2015	08.10.2015	
Čas počátku měření		hh:mm	10:01	8:37	8:41	
Čas konce měření		hh:mm	14:10	13:12	12:44	
Průtok suchých spalín při referenčním kyslíku na hmotnost paliva		m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg <sub>pal</sub>	11,72	11,72	11,72	
Referenční kyslík		% obj.	10	10	10	
Měrné emise na výhřevnost paliva	benzo(a)pyren	mg/GJ	0,062	0,010	0,010	0,027
	benzo(b)fluoranten	mg/GJ	2,7	1,1	0,7	1,5
	benzo(k)fluoranten	mg/GJ	0,49	0,28	0,28	0,35
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/GJ	0,076	0,048	0,041	0,055
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/GJ	<b>3,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,1</b>	<b>1,9</b>
Měrné emise na hmotnost paliva	benzo(a)pyren	mg/t	1,5	0,2	0,2	0,7
	benzo(b)fluoranten	mg/t	65	26	18	36
	benzo(k)fluoranten	mg/t	12	6,8	6,8	8,4
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/t	1,8	1,2	1,0	1,3
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/t	<b>80</b>	<b>34</b>	<b>26</b>	<b>47</b>
Procentuální rozložení	benzo(a)pyren	%	2	1	1	1
	benzo(b)fluoranten	%	81	76	69	75
	benzo(k)fluoranten	%	15	20	26	20
	indeno(1,2,3-cd)pyren	%	2	3	4	3
	<b>Suma 4 PAU</b>	%	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Toxický ekvivalent směsi		mg/t	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>5</b>

**Tab. 5.4:** Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Benekov – Ling 25

## 5.7 Zplyňovací kotel Atmos kombi AC25S

Základní koncepcí zplyňovacích kotlů je poznatek, že kvalitně spalovat plynné palivo je výrazně jednodušší než spalovat palivo tuhé. U zplyňovacích kotlů se palivo přikládá do zásobníku paliva, který je umístěn nad spalovací komorou a hořákem. Tuhé palivo je procesem zplyňování převedeno na plynné a vzniklý plyn je následně spálen. Schéma zplyňovacího kotle je uvedeno na Obr. 5.9.



**Obr. 5.9:** Schéma zplyňovacího kotle



**Obr. 5.10:** kotel Atmos kombi AC25S

Při spalovací zkoušce byl použit zplyňovací kotel Atmos kombi AC25S (Obr. 5.9):

- jmenovitý výkon - 26 kW
- předepsané palivo - černé uhlí ořech 1 s výhřevností 17 až 30 MJ/kg  
- hnědouhelné brikety s výhřevností 19 až 23 MJ/kg

Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí PAU jsou uvedeny v Tab. 5.5.

Číslo zkoušky			4	5	6	průměr 4 až 6
Kotel			ATMOS AC25S	ATMOS AC25S	ATMOS AC25S	ATMOS AC25S
Účinnost kotle (nepřímá metoda)		%	80,1	80,9	81,0	
Palivo			ČU	ČU	ČU	ČU
Výhřevnost paliva		GJ/t	28,12	28,12	28,12	
Datum měření		dd.mm.rrrr	13.10.2015	14.10.2015	16.10.2015	
Čas počátku měření		hh:mm	9:03	9:09	9:09	
Čas konce měření		hh:mm	13:39	14:04	13:16	
Průtok suchých spalín při referenčním kyslíku na hmotnost paliva		m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /kg <sub>pal</sub>	13,66	13,66	13,66	
Referenční kyslík		% obj.	10	10	10	
Měrné emise na výhřevnost paliva	benzo(a)pyren	mg/GJ	115	1,3	1,3	39
	benzo(b)fluoranten	mg/GJ	192	6,1	6,2	68
	benzo(k)fluoranten	mg/GJ	36	1,3	1,9	13
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/GJ	104	1,7	1,3	35
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/GJ	<b>446</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>156</b>
Měrné emise na hmotnost paliva	benzo(a)pyren	mg/t	3 235	37	37	1103
	benzo(b)fluoranten	mg/t	5 392	170	174	1 912
	benzo(k)fluoranten	mg/t	1 003	36	54	364
	indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/t	2 912	47	36	998
	<b>Suma 4 PAU</b>	mg/t	<b>12 541</b>	<b>290</b>	<b>300</b>	<b>4 377</b>
Procentuální rozložení	benzo(a)pyren	%	26	13	12	17
	benzo(b)fluoranten	%	43	59	58	53
	benzo(k)fluoranten	%	8	12	18	13
	indeno(1,2,3-cd)pyren	%	23	16	12	17
	<b>Suma 4 PAU</b>	%	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Toxický ekvivalent směsi		mg/t	<b>4 166</b>	<b>63</b>	<b>63</b>	<b>1 430</b>

**Tab. 5.5:** Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Atmos kombi AC25S

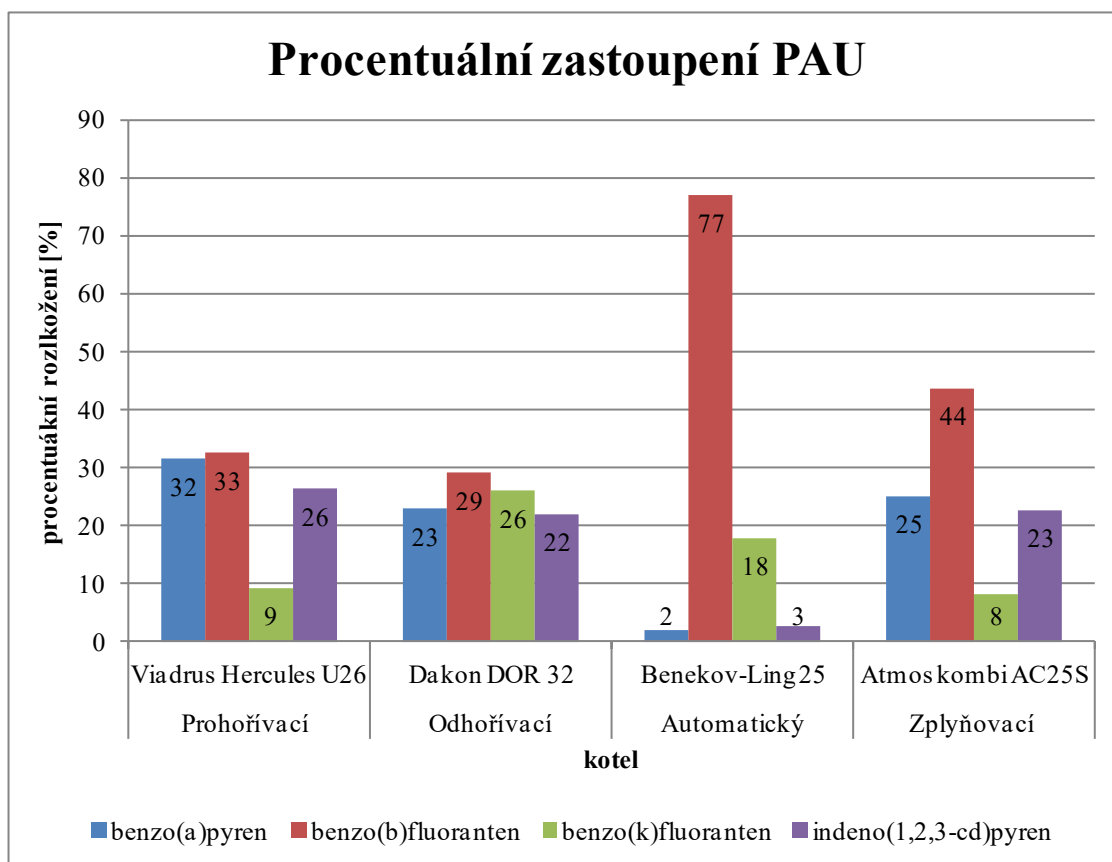
## 5.8 Porovnání získaných dat

V Tab. 5.6 je pro každý typ kotle a každou ze čtyř sledovaných látek ze skupiny PAU uvedena průměrná hodnota měrných emisí ze 3 provedených spalovacích zkoušek.

Typ kotle	Prohořivací	Odhořivací	Automatický	Zplyňovací
Název kotle	Viadrus Hercules U26	Dakon DOR 32	Benekov-Ling 25	Atmos kombi AC25S
Měrné emise [mg/t]				
benzo(a)pyren	10 491	809	0,7	1 103
benzo(b)fluoranten	10 805	1 031	36,0	1 912
benzo(k)fluoranten	3 125	924	8,4	364
indeno(1,2,3-cd)pyren	8 782	779	1,3	998
<b>Suma 4 PAU</b>	<b>33 204</b>	<b>3 542</b>	<b>47,0</b>	<b>4 377</b>
<b>Toxický ekvivalent směsi</b>	<b>12 762</b>	<b>1 082</b>	<b>5</b>	<b>1 430</b>

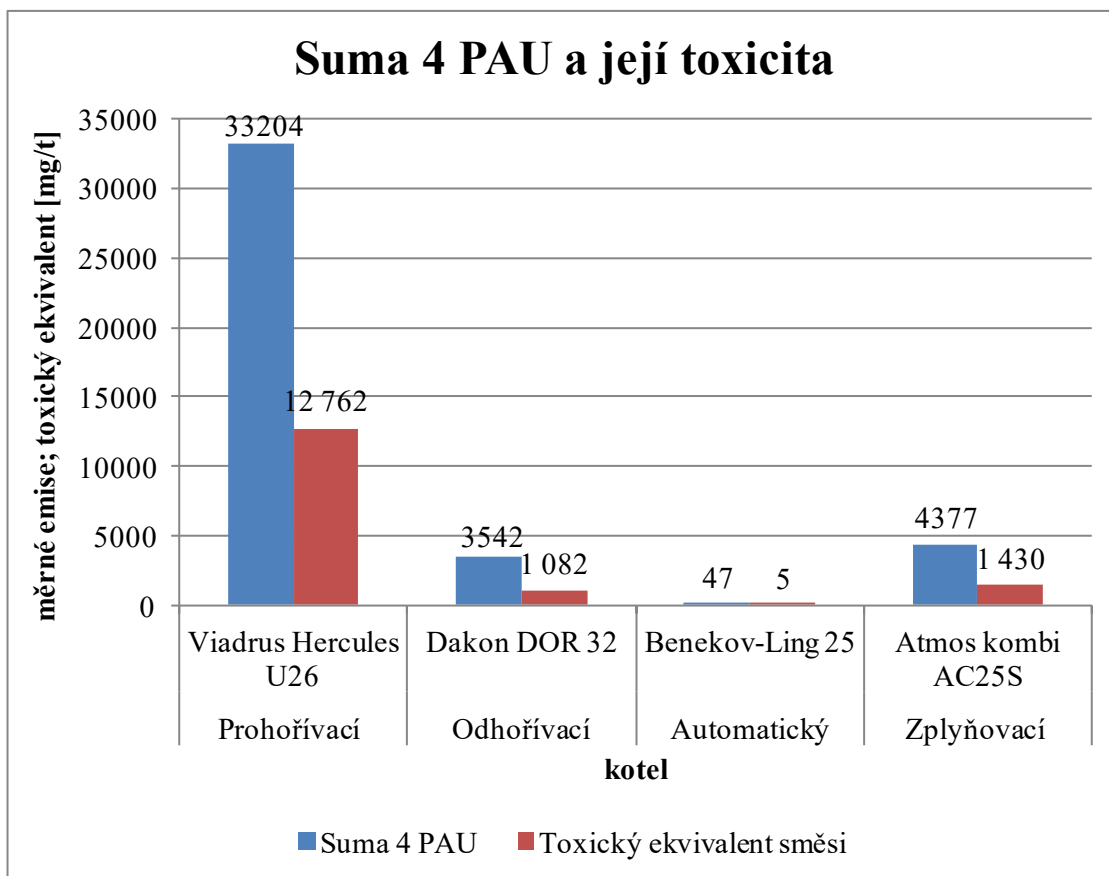
**Tab. 5.6:** Průměrná hodnota měrných emisí (zkoušky 1,2,3)

Hodnoty z Tab. 5.6 jsou procentuálně znázorněny v grafu na Obr. 5.11.



**Obr. 5.11:** Procentuální zastoupení PAU (zkoušky 1,2,3)

Na Obr. 5.12 je znázorněna suma 4 PAU a toxický ekvivalent směsi pro jednotlivé typy kotlů.



**Obr. 5.12:** Suma 4 PAU a její toxicita (zkoušky 1,2,3)

V Tab. 5.5, ve které jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí zplyňovacího kotle Atmos kombi AC25S, jsou patrné velké rozdíly mezi první a dalšími spalovacími zkouškami. Například hodnota pro benzo(a)pyren dosáhla při první zkoušce 3235 mg/t, zatímco při druhé a třetí zkoušce 37 mg/t. Obdobně velké rozdíly lze v tabulce vyčíst také pro zbylé tři sledované látky ze skupiny PAU. Z toho lze usuzovat, že hodnoty získané při první spalovací zkoušce na tomto kotli zřejmě nejsou relevantní. To mohlo být způsobeno například tím, že se v kotli topilo po delší době a obsluha kotle se seznamovala s jeho provozem. Zahrnutí hodnot této první spalovací zkoušky na kotli Atmos do Tab. 5.6 a grafů na Obr. 5.11 a Obr. 5.12 pak zásadním způsobem zkreslilo výsledné porovnání jednotlivých typů spalovacích zařízení. Pokud bychom na první spalovací zkoušku u každého typu kotle pohlíželi jako na seznámení se s obsluhou a chodem kotle a do vzájemného porovnání zahrnuli hodnoty až z druhé a třetí spalovací zkoušky, získali bychom následující výsledky.

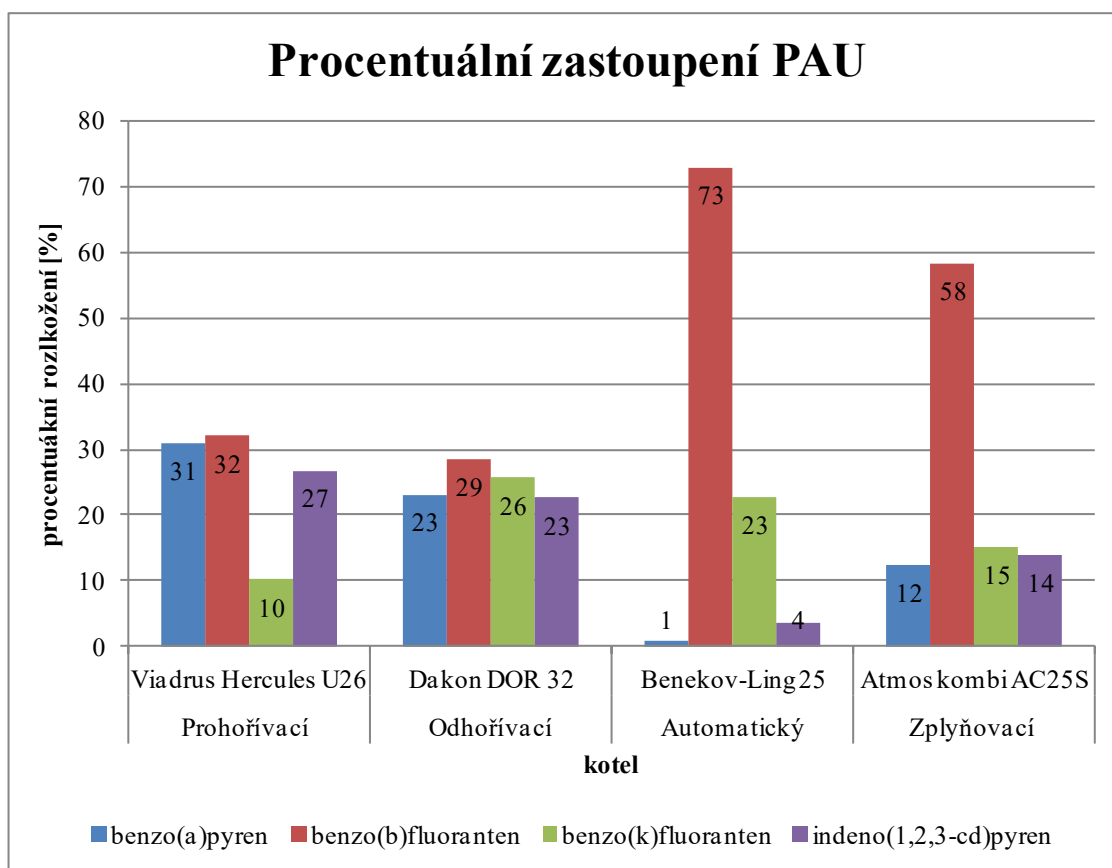


V Tab. 5.7 je pro každý typ kotle a každou ze čtyř sledovaných látek ze skupiny PAU uvedena průměrná hodnota měrných emisí z 2. a 3. provedené spalovací zkoušky.

Typ kotle	Prohořivací	Odhořivací	Automatický	Zplyňovací
Název kotle	Viadrus Hercules U26	Dakon DOR 32	Benekov-Ling 25	Atmos kombi AC25S
Měrné emise [mg/t]				
benzo(a)pyren	9 670	1 043	0,2	37
benzo(b)fluoranten	9 986	1 286	22	172
benzo(k)fluoranten	3 193	1 157	7	45
indeno(1,2,3-cd)pyren	8 366	1 019	1	41
<b>Suma 4 PAU</b>	<b>31 216</b>	<b>4 504</b>	<b>30</b>	<b>295</b>
<b>Toxický ekvivalent směsi</b>	<b>11 825</b>	<b>1 389</b>	<b>3</b>	<b>63</b>

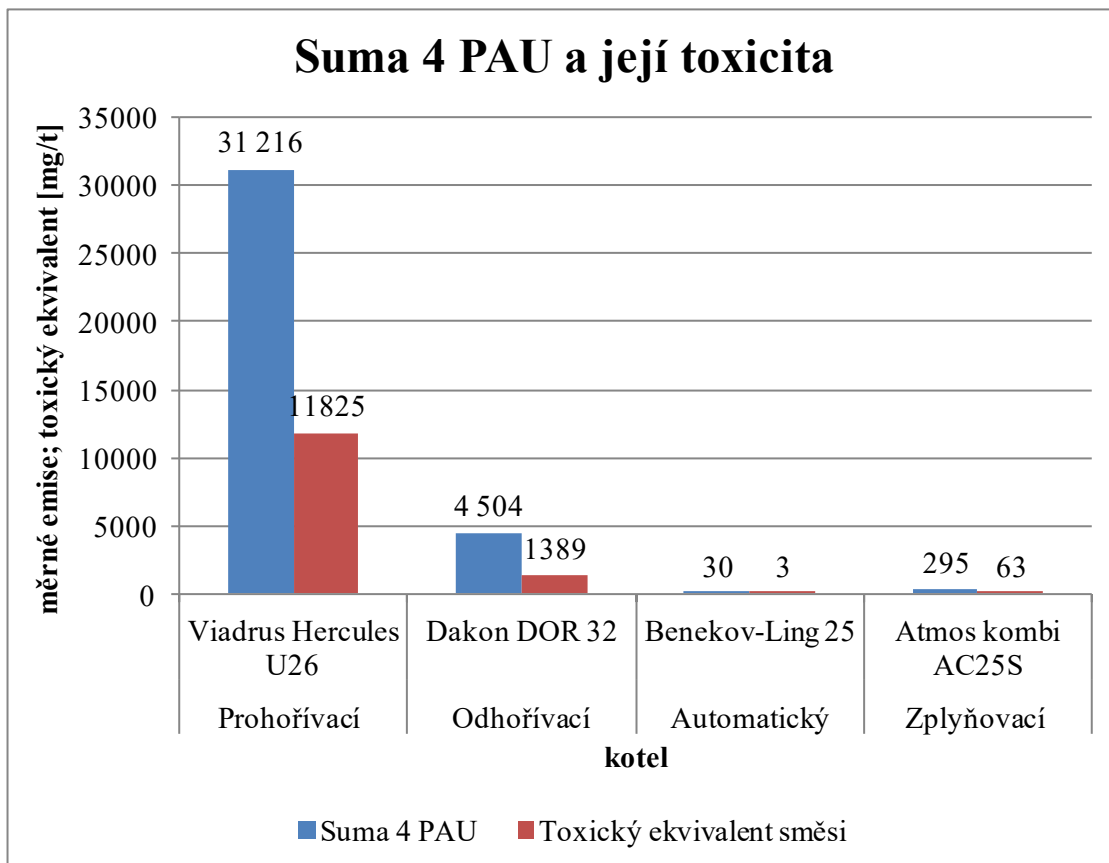
**Tab. 5.7:** Průměrná hodnota měrných emisí (zkoušky 2,3)

Z Tab. 5.7 je patrné, že nejvíce emisí PAU vzniká při spalování v prohořivacím kotli, nejméně pak v automatickém. Rozdíl činí až několik řádů. Například hodnota měrných emisí benzo(a)pyrenu dosáhla při spalování černého uhlí v prohořivacím kotli hodnoty 9 670 mg/t, u automatického kotle pouze hodnoty 0,2 mg/t.



**Obr. 5.13:** Procentuální zastoupení PAU (zkoušky 2,3)

Při porovnání hodnot v grafu na Obr. 5.13 je patrné, že modernější kotle (automatické, zplyňovací) mají příznivější procentuální zastoupení sledovaných PAU ve spalínách. Benzo(a)pyren jako nejtoxičtější látka je v nich obsažen pouze v malém poměru. Oproti tomu u starších typů kotlů (prohořivací, odhořivací) je jeho procento ve spalínách mnohem vyšší.

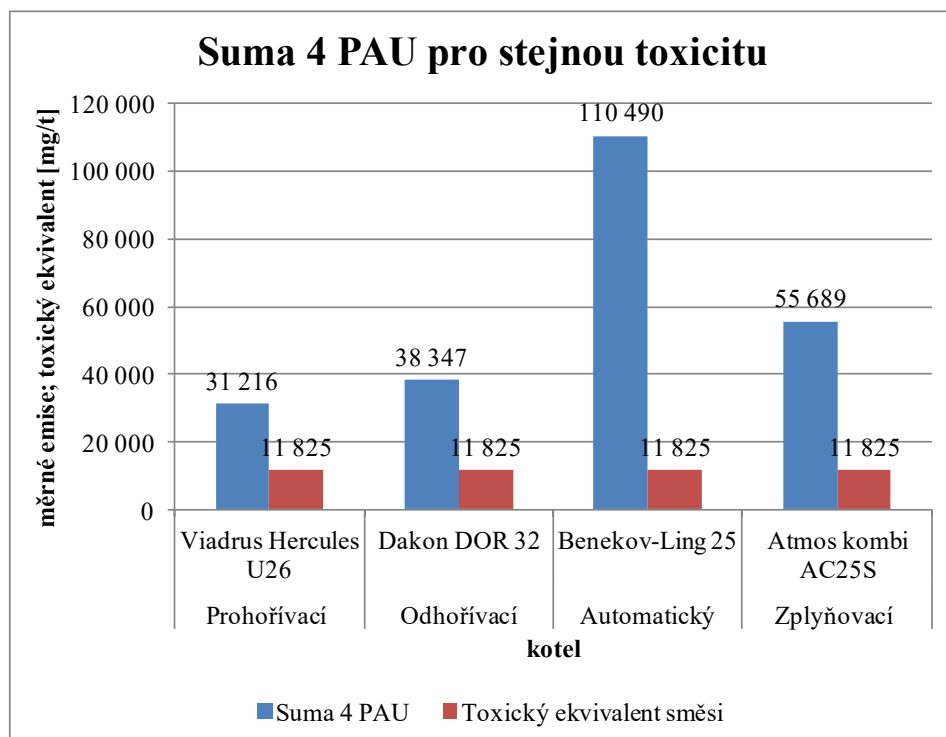


**Obr. 5.14:** Suma 4 PAU a její toxicita (zkoušky 2,3)

Z Obr. 5.14 lze vyčíst, že rozdíl ve vyprodukovaných emisích PAU u prohořivacího kotle a ostatních typů kotlů je markantní. V porovnání s automatickým kotlem vyprodukuje zplyňovací kotel zhruba 10 krát více emisí PAU, odhořivací kotel přibližně 150 krát více emisí PAU a prohořivací kotel dokonce 1000 krát více emisí PAU.

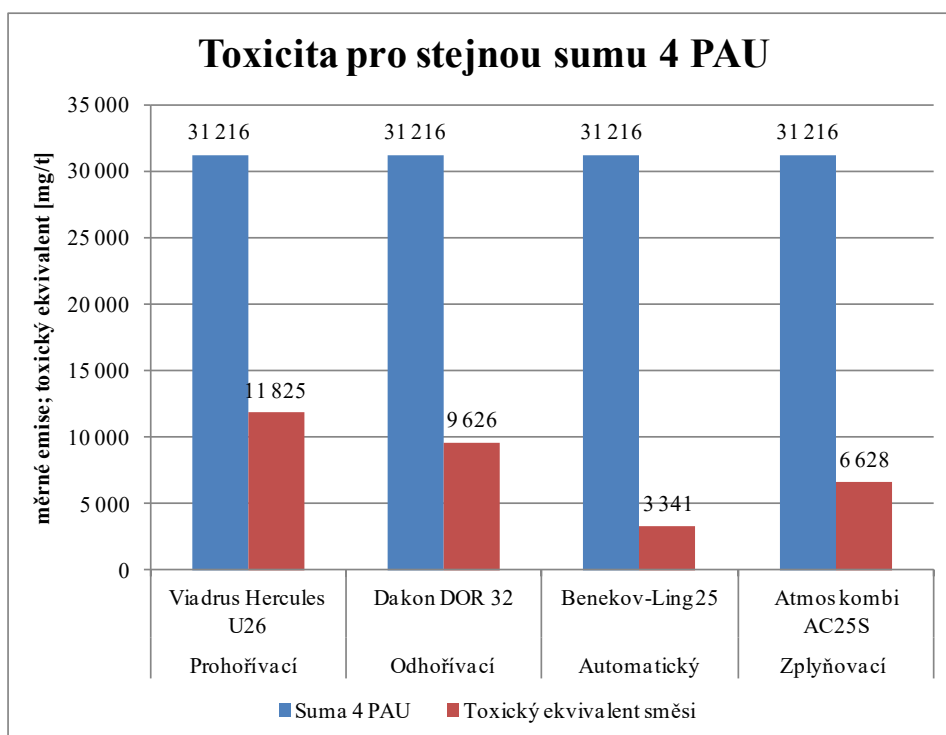
O nevhodnosti používání starších typů kotlů svědčí i hodnota toxického ekvivalentu směsi pro jednotlivé kotle. Prohořivací kotle vykazují mnohem vyšší toxicitu, která je způsobena vysokým obsahem benzo(a)pyrenu ve spalínách. Z tohoto důvodu by bylo vhodné přestat tyto kotle co nejdříve používat.

Pro zajímavost je v grafu na Obr. 5.15 znázorněn předpoklad, kolik měrných emisí by musely vyprodukovat jednotlivé typy kotlů, aby dosáhly stejné toxicity jako prohořivací kotel.



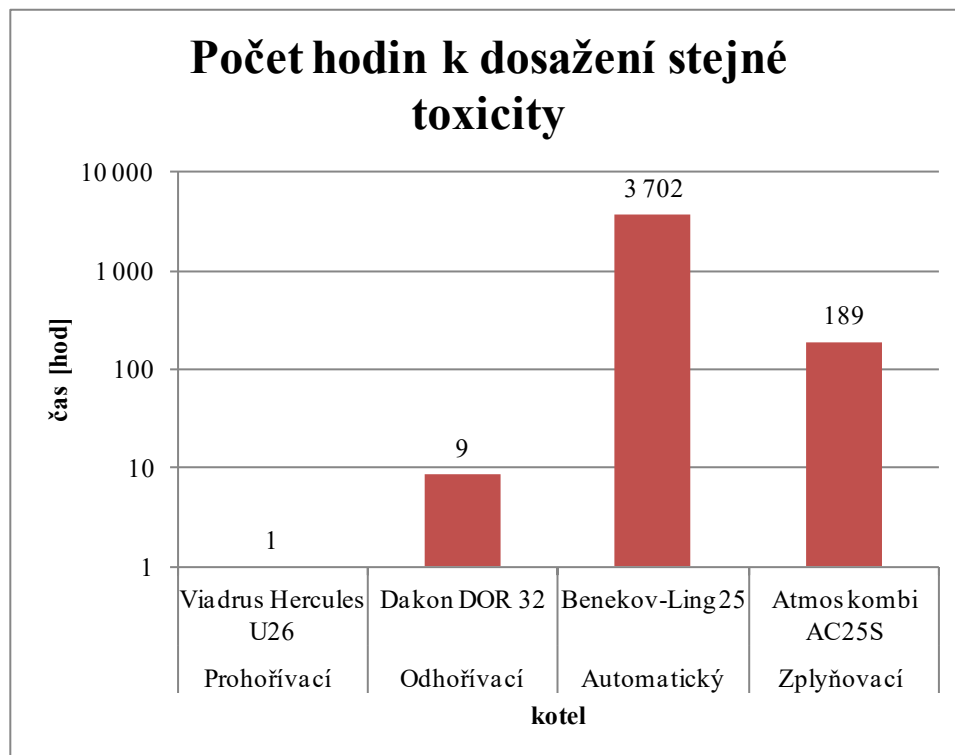
**Obr. 5.15:** Suma 4 PAU pro stejnou toxicitu

Obdobně můžeme v grafu na Obr. 5.16 znázornit, jak by se lišila toxicita jednotlivých typů kotlů za předpokladu, že by vyprodukovaly shodné množství měrných emisí.



**Obr. 5.16:** Toxicita pro stejnou sumu 4 PAU

Nejjasnější představu o rozdílech v toxicitě jednotlivých kotlů si lze udělat z grafu na Obr. 5.17, ve kterém je znázorněno, po kolika hodinách provozu dosáhnou ostatní typy kotlů stejné toxicity jako prohořivací kotel za jednu hodinu provozu.



**Obr. 5.17:** Počet hodin k dosažení stejné toxicity

Z grafu je patrné, že toxicity, které dosáhne prohořivací kotel za jednu hodinu provozu, dosáhne odhořivací kotel za 9 hodin provozu, zplyňovací kotel za 189 hodin provozu (zhruba 8 dnů) a automatický dokonce za 3 702 hodin provozu (zhruba 5 měsíců).

Také výše uvedené grafy potvrzují, jak by bylo prospěšné vyměnit staré typy kotlů za modernější.

## 5.9 Separátor částic – Impaktor

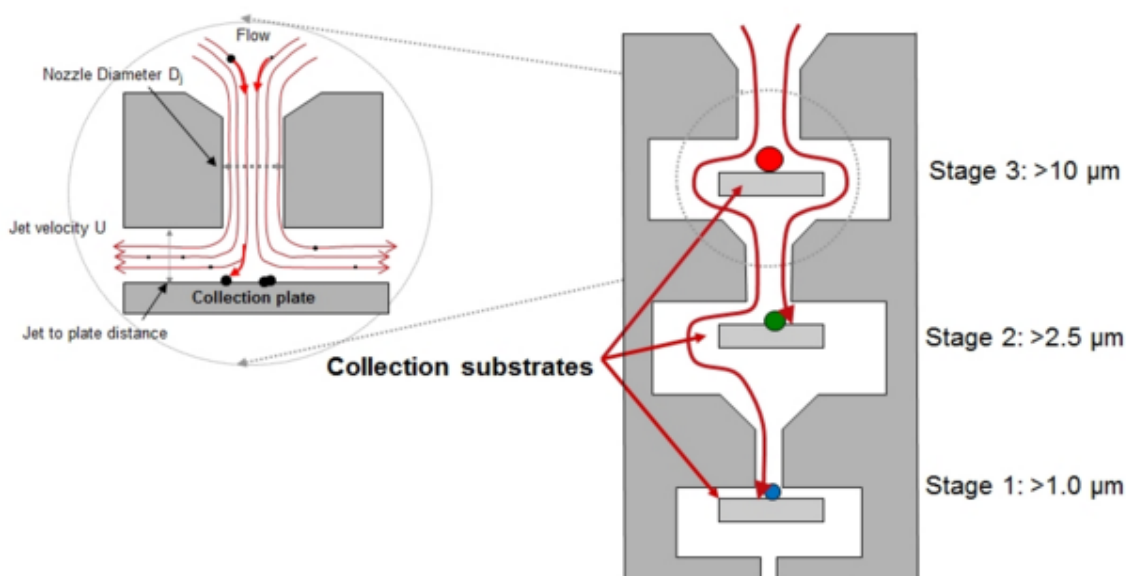
PAU kondenzují na tuhých částicích a vážou se převážně na částice malé. Čím větší množství menších částic ve spalínách je, tím větší je jejich relativní povrch vůči hmotnosti a tím větší potencionální prostor pro navázání PAU vzniká. Z tohoto důvodu se při rozbořech spalín věnuje pozornost také výskytu těchto malých částic ve spalínách. K tomuto účelu se používá impaktor.

Jedná se o 13 patrovou kaskádu (Obr. 5.18), která slouží pro rozčlenění částic podle velikosti. A to v širokém rozsahu od 30 nm do 10  $\mu\text{m}$ . Každá frakce částic se shromažďuje na kruhové fólii, která má průměr 25 mm a slouží jako sběrný povrch. Tyto fólie jsou hliníkové nebo polykarbonátové. Impaktor má jednoduchou a robustní konstrukci z nerezové oceli. Ta umožňuje odběr při ohřevu jednotky až na 200°C. Impaktor se nejčastěji používá ke sledování kvality ovzduší a měření emisí ze stacionárních zdrojů. Konstrukční výkres separátoru částic (sestava impaktoru) je přiložen jako dokument č.001.



**Obr. 5.18:** Separátor částic – Impaktor [16]

Princip fungování impaktoru je založen na využití setrvačných sil (Obr. 5.19). Tok vzorku je nejprve veden přes trysky k dosažení určité rychlosti průtoku. Větší částice nemohou následovat tok proudnice a dopadají na sběrnou desku (fólii) v daném patře impaktoru. Menší částice pokračují do dalších pater, kde se celý proces opakuje. Aby nedocházelo k odrazu částic od fólie, jsou fólie mazány. Před měřením a po měření se fólie váží.



**Obr. 5.19:** Princip fungování impaktoru [16]

Při spalovacích zkouškách kotlů byl k ředicímu tunelu připojen separátor částic (impaktor) k rozčlenění velikostí jemných a velmi jemných částic a PAU. Před impaktor byly zařazeny dvě ejektorové ředičky ke snížení koncentrace. Podle doporučení výrobce impaktoru by se navážka na jedné záchytné fólii měla během jednoho měření pohybovat okolo 1 mg. Aby byl pokryt celý úsek měření (v našem případě 4 hodiny), bylo tedy nutné koncentraci částic snížit naředěním. Ředičky snižovaly koncentraci 50 až 60 krát a samotný ředící tunel 4 až 5 krát. Došlo tedy k celkovému naředění 200 až 300 krát. První ředička byla vytápěna, aby ředěním nedocházelo k jejímu ochlazení a tím i nežádoucímu snížení teploty rosného bodu.

## 5.10 Přehled získaných dat z impaktoru

Stejně jako v kapitole 5.8 budeme i zde předpokládat, že první spalovací zkouška u každého typu kotle sloužila jako seznámení se s obsluhou a chodem kotle. Proto budou do následujících tabulek a grafů zahrnuty hodnoty získané z druhé a třetí zkoušky.

Při spalovací zkoušce na prohřívacím kotli nebylo možné měření impaktorem realizovat, protože během několika minut došlo k ucpání řediček.

Navážky na jednotlivých patrech impaktoru ze spalovacích zkoušek odhořivacího kotle jsou uvedeny v Tab. 5.8.

Patro	D50 [ $\mu\text{m}$ ]	navážka 1 [mg]	navážka 2 [mg]	navážka 3 [mg]	průměr 2 až 3 [mg]	%	kumulativní %
1	0,0282	0,032	0,039	0,043	0,041	1,45	1,45
2	0,0549	0,160	0,166	0,259	0,212	7,50	8,95
3	0,0934	0,475	0,382	0,586	0,484	17,09	26,04
4	0,157	0,404	0,433	0,591	0,512	18,08	44,11
5	0,262	0,305	0,391	0,646	0,519	18,31	62,42
6	0,382	0,244	0,262	0,338	0,300	10,59	73,01
7	0,614	0,182	0,210	0,286	0,248	8,76	81,77
8	0,949	0,139	0,196	0,251	0,224	7,89	89,66
9	1,6	0,093	0,093	0,182	0,137	4,85	94,51
10	2,39	0,058	0,064	0,138	0,101	3,57	98,08
11	4	0,019	0,022	0,051	0,037	1,29	99,36
12	6,6	0,010	0,008	0,017	0,013	0,44	99,81
13	9,96	0,008	0,007	0,004	0,005	0,19	100,00

**Tab. 5.8:** Odhořivací kotel – navážky na patrech impaktoru

Navážky na jednotlivých patrech impaktoru ze spalovacích zkoušek automatického kotle jsou uvedeny v Tab. 5.9.

Patro	D50 [μm]	navážka 1 [mg]	navážka 2 [mg]	navážka 3 [mg]	průměr 2 až 3 [mg]	%	kumulativní %
1	0,0282	0,036	0,050	0,029	0,040	1,08	1,08
2	0,0549	0,315	0,472	0,348	0,410	11,23	12,32
3	0,0934	1,308	1,448	1,388	1,418	38,85	51,17
4	0,157	0,847	0,913	0,891	0,902	24,72	75,89
5	0,262	0,317	0,386	0,385	0,386	10,56	86,45
6	0,382	0,160	0,208	0,182	0,195	5,34	91,79
7	0,614	0,088	0,124	0,110	0,117	3,21	95,00
8	0,949	0,067	0,084	0,067	0,076	2,07	97,07
9	1,6	0,042	0,041	0,034	0,037	1,03	98,10
10	2,39	0,038	0,044	0,037	0,041	1,11	99,21
11	4	0,020	0,021	0,016	0,019	0,51	99,71
12	6,6	0,005	0,008	0,004	0,006	0,16	99,88
13	9,96	0,004	0,005	0,004	0,005	0,12	100,00

**Tab. 5.9:** Automatický kotel – navážky na patrech impaktoru

Navážky na jednotlivých patrech impaktoru ze spalovacích zkoušek zplyňovacího kotle jsou uvedeny v Tab. 5.10.

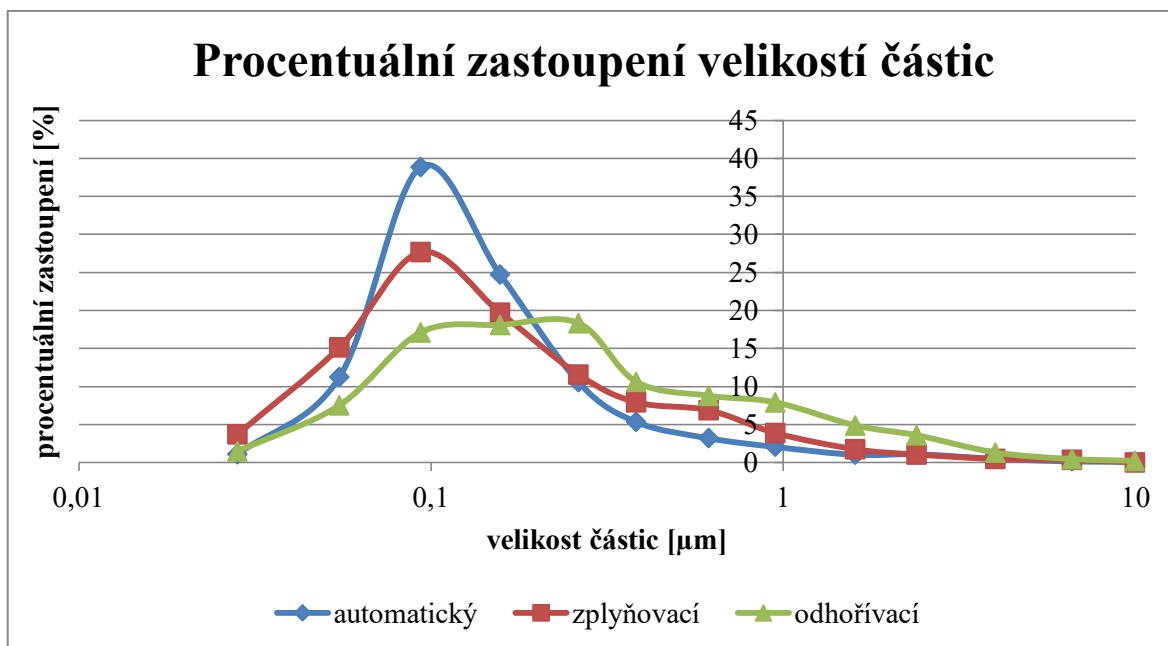
Patro	D50 [μm]	navážka 1 [mg]	navážka 2 [mg]	navážka 3 [mg]	průměr 2 až 3 [mg]	%	kumulativní %
1	0,0282	0,025	0,051	0,013	0,032	3,70	3,70
2	0,0549	0,111	0,155	0,107	0,131	15,14	18,83
3	0,0934	0,333	0,201	0,278	0,240	27,67	46,50
4	0,157	0,738	0,144	0,197	0,171	19,70	66,20
5	0,262	0,963	0,067	0,133	0,100	11,55	77,76
6	0,382	1,043	0,058	0,079	0,068	7,91	85,67
7	0,614	0,713	0,048	0,071	0,059	6,87	92,55
8	0,949	0,361	0,026	0,041	0,034	3,87	96,42
9	1,6	0,179	0,014	0,016	0,015	1,73	98,15
10	2,39	0,194	0,011	0,007	0,009	1,04	99,19
11	4	0,064	0,005	0,003	0,004	0,46	99,65
12	6,6	0,021	0,003	0,003	0,003	0,35	100,00
13	9,96	0,022	-0,002	0,002	0,000	0,00	100,00

**Tab. 5.10:** Zplyňovací kotel – navážky na patrech impaktoru

Z uvedených tabulek lze vyčíst, že u automatického a zplyňovacího kotle došlo k největšímu zachytu na 2. až 5. patře a největší navážka byla na 3. patře. U odhořivacího kotle došlo k největšímu zachytu na 3. až 6. patře a největší navážka byla na 5. patře.



Procentuální zastoupení velikostí částic pro automatický, zplyňovací a odhořivací kotel je uvedeno v grafu na Obr. 5.20.



**Obr. 5.20:** Procentuální zastoupení velikostí částic

Z grafu na Obr. 5.20 lze vyčíst, že u odhořivacího kotle bylo rozložení částic z hlediska velikosti rovnoměrnější. U automatického a zplyňovacího kotle měly největší procentuální zastoupení částice s velikostí přibližně 0,1  $\mu\text{m}$ .

## 6 Výpočet alternativních bilancí emisí benzo(a)pyrenu z vytápění domácností tuhými palivy v ČR

V této kapitole byly využity poznatky z [9,17,18].

Aby bylo možné spočítat případné dopady **Kotlíkových dotací**, je třeba na základě dostupných dat a odborných odhadů co nejpřesněji stanovit roční množství vyprodukovaných emisí benzo(a)pyrenu, které vzniknou spálením konkrétního paliva (černé uhlí, hnědé uhlí, biomasa) v jednotlivých typech spalovacího zařízení (prohořivací, odhořivací, zplyňovací, automatické).

K výpočtu bilancí byla využita Metodika stanovení „váhy“ typu paliva a typu spalovacího zařízení pro výpočet emisních faktorů znečišťujících látek měrných emisí znečišťujících látek (dále jen metodika).

### 6.1 Výpočet a odhad současných emisí benzo(a)pyrenu

K určení počtu domácností vytápěných tuhými palivy byla využita data z posledního sčítání lidu z roku 2011. V Tab. 6.1 jsou pro jednotlivé kraje uvedeny počty domácností, které používají k vytápění tuhá paliva (uhlí, biomasa).

Kraj	počet bytů v rodinných domech		počet bytů v bytových domech	
	Uhlí	Biomasa	Uhlí	Biomasa
Praha	2 164	1 309	731	423
Středočeský kraj	71 095	30 645	8 320	3 072
Jihočeský kraj	28 107	32 410	4 889	4 787
Plzeňský kraj	25 560	20 126	3 853	2 377
Karlovarský kraj	7 794	4 926	1 848	1 311
Ústecký kraj	22 707	10 882	4 479	2 534
Liberecký kraj	17 945	11 743	3 174	1 961
Královéhradecký kraj	24 976	15 711	3 661	2 277
Pardubický kraj	19 255	17 323	1 957	1 368
Kraj Vysočina	25 576	22 381	2 176	1 323
Jihomoravský kraj	7 031	21 786	972	1 301
Olomoucký kraj	10 689	23 133	1 922	2 329
Zlínský kraj	8 534	24 597	396	998
Moravskoslezský kraj	25 071	22 497	3 835	3 546
<b>celkem</b>	<b>296 504</b>	<b>259 469</b>	<b>42 213</b>	<b>29 607</b>
<b>celkem</b>	<b>627 793</b>			

**Tab. 6.1:** Počty domácností vytápěných tuhými palivy [18]

V souladu s metodikou byla vytvořena Tab. 6.2 s odhadem, kolika procenty se podílí konkrétní typ zařízení na celkové spotřebě daného paliva.

typ zařízení	Uhlí	Biomasa
	%	%
ocelové kotle (převážně odhořivací)	82,40	10,76
litinové kotle (převážně prohořivací)	14,60	60,88
automatické kotle na uhlí	3,00	-
automatické kotle na pelety	-	3,09
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	-	25,27
<b>celkem</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**Tab. 6.2:** Odhad podílu typu zařízení na spotřebě daného paliva

Na základě údajů z Tab. 6.1 a Tab. 6.2 byla sestavena Tab. 6.3, ve které jsou spočítány domácnosti podle typu kotle a podle typu domácnosti.

typ konstrukce spalovacího zařízení	počet zařízení na		počet bytů v rodinných domech		počet bytů v bytových domech	
	uhlí	biomasa	uhlí	biomasa	uhlí	biomasa
	ks	ks	ks	ks	ks	ks
ocelové kotle (převážně odhořivací)	279 103	31 105	244 319	27 919	34 784	3 186
litinové kotle (převážně prohořivací)	49 453	175 989	43 290	157 965	6 163	18 025
automatické kotle na uhlí	10 162	-	8 895	-	1 266	-
automatické kotle na pelety	-	8 932	-	8 018	-	915
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	-	73 050	-	65 568	-	7 482
<b>celkem</b>	<b>338 717</b>	<b>289 076</b>	<b>296 504</b>	<b>259 469</b>	<b>42 213</b>	<b>29 607</b>
			<b>627 793</b>			

**Tab. 6.3:** Odhad počtu domácností podle typu kotle a typu domácnosti

K dalším výpočtům je potřeba stanovit roční spotřebu paliv průměrných domácností. Pro výpočet spotřeby paliva jedné domácnosti za rok se využívá průměrná roční spotřeba tepla pro vytápění jednoho bytu, výhřevnost paliva a reálně dosahovaná účinnost spalovacího zařízení. Tyto hodnoty byly převzaty z metodiky.

Výpočet se provádí podle vzorce:

$$\text{spotřeba pal. jedné domácnosti} \left[ \frac{t}{rok} \right] = \frac{\text{spotřeba tepla jednoho bytu [GJ/rok]}}{\frac{\text{účinnost [\%]}}{100} \cdot \text{výhřevnost paliva [GJ/t]}} \quad (1)$$

Vypočtená data a převzaté hodnoty [9] jsou uvedeny v Tab. 6.4.

typ konstrukce spalovacího zařízení	byť v rodinných domech		byť v bytových domech		účinnost spalovacích zařízení	
	uhlí	biomasa	uhlí	biomasa	uhlí	biomasa
	tun paliva/rok byť				%	
ocelové kotle (převážně odhořivací)	4,8	6,0	2,9	3,7	60	60
litinové kotle (převážně prohořivací)	4,8	6,5	2,9	4,0	60	55
automatické kotle na uhlí	3,6	-	2,2	-	80	-
automatické kotle na pelety	-	4,2	-	2,6	-	85
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	-	4,5	-	2,8	-	80
roční spotřeba tepla jednoho bytu (GJ/byť za rok)	52,3		32,2			
výhřevnost paliva (GJ/tunu)	18,3	14,6	18,3	14,6		

**Tab. 6.4:** Roční spotřeba paliv průměrných domácností a účinnost spalovacích zařízení

Součinem počtu domácností z Tab. 6.3 a roční spotřeby paliv z Tab. 6.4 je pro jednotlivé kategorie vypočtena v Tab. 6.5 roční spotřeba uhlí a biomasy.

typ konstrukce spalovacího zařízení	počet bytů v rodinných domech		počet bytů v bytových domech		celkem		uhlí	biomasa
	uhlí	biomasa	uhlí	biomasa	uhlí	biomasa		
	t/rok				t/tok		%	
ocelové kotle (převážně odhořivací)	1 163 743	166 685	102 006	11 710	1 265 749	178 395	83,0	10,9
litinové kotle (převážně prohořivací)	206 197	1 028 836	18 074	72 279	224 271	1 101 115	14,7	67,6
automatické kotle na uhlí	31 777	-	2 785	-	34 562	-	2,3	-
automatické kotle na pelety	-	33 789	-	2 374	-	36 163	-	2,2
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	-	293 596	-	20 626	-	314 222	-	19,3
celkem	1 401 717	1 522 905	122 866	106 988	1 524 583	1 629 894	100,0	100,0

**Tab. 6.5:** Roční spotřeba uhlí a biomasy

Aby byl výpočet vyprodukovaných emisí benzo(a)pyrenu co nejpřesnější, je potřeba roční spotřebu uhlí z Tab. 6.5 rozdělit na spotřebu hnědého a černého uhlí. K tomu byly využity hodnoty procentuálního zastoupení hnědého a černého uhlí v jednotlivých krajích z Tab. 6.6 a počty domácností používající k vytápění tuhá paliva z Tab. 6.1 pro jednotlivé kraje.

Kraj	HU	CU+koks
	%	
Praha	93,0	7,0
Středočeský kraj	95,4	4,6
Jihočeský kraj	96,9	3,1
Plzeňský kraj	97,3	2,7
Karlovarský kraj	100,0	0,0
Ústecký kraj	99,7	0,3
Liberecký kraj	99,4	0,6
Královéhradecký kraj	97,2	2,8
Pardubický kraj	95,1	4,9
Kraj Vysočina	96,0	4,0
Jihomoravský kraj	89,7	10,3
Olomoucký kraj	87,3	12,7
Zlínský kraj	85,5	14,5
Moravskoslezský kraj	83,9	16,1

**Tab. 6.6:** Procentuální zastoupení uhlí [18]

Pro výpočet váženého průměru byl použit následující vzorec:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Kde  $x_i$  ... procentuální zastoupení paliva z tabulky 6.6,

$w_i$  ... počet domácností z tabulky 6.1 sloužící jako váha.

Pomocí váženého průměru, kde počty domácností z Tab. 6.1 sloužily jako váha, bylo vypočteno, že průměrné zastoupení hnědého uhlí činí 95% a zastoupení černého uhlí činí 5% z roční spotřeby uhlí. V tomto poměru byla přepočtena roční spotřeba uhlí z Tab. 6.5 na roční spotřebu hnědého a černého uhlí v Tab. 6.7.

typ konstrukce spalovacího zařízení	byty v rodinných domech			byty v bytových domech			celkem		
	uhlí		biomasa	uhlí		biomasa	uhlí		biomasa
	t/rok						t/rok		
ocelové kotle (převážně odhořivací)	HU	1104722	166 685	HU	96 833	11 710	HU	1 201 555	176 131
	CU	59 021		CU	5 173		CU	64 194	
litinové kotle (převážně prohořivací)	HU	195 740	1 028 836	HU	17 157	72 279	HU	212 897	1 086 941
	CU	10 458		CU	917		CU	11 374	
automatické kotle na uhlí	HU	30 165	-	HU	2 644	-	HU	32 809	-
	CU	1 612		CU	141		CU	1 753	
automatické kotle na pelety	HU	-	33 789	HU	-	2 374	HU	-	35 683
	CU	-		CU	-		CU	-	
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	HU	-	293 596	HU	-	20 626	HU	-	310 191
	CU	-		CU	-		CU	-	
celkem hnědé uhlí	1 330 627		-	116 634		-	1 447 262		-
celkem černé uhlí	71 090		-	6 231		-	77 321		-
celkem	1 401 717		1 522 905	122 866		106 988	1 524 583		1 629 894

**Tab. 6.7:** Roční spotřeba biomasy, hnědého a černého uhlí

K výpočtu vyprodukovaných emisí benzo(a)pyrenu byly dále využity hodnoty měrných emisí, které jsou uvedeny v Tab. 6.8.

Měrné emise B(a)P [mg/t]			Emisní faktor [mg/t]
HU	prohořivací	8 639	
	odhořivací	2 779	3 577
	automatický	2	
	zplynovací	9	
CU	prohořivací	8 453	7 118
	odhořivací	7 079	
	automatický	8	
	zplynovací	-	
Biomasa	prohořivací	1 919	1 447
	odhořivací	1 066	
	automatický	35	
	zplynovací	252	

**Tab. 6.8:** Měrné emise benzo(a)pyrenu [18]

Vynásobením roční spotřeby paliv z Tab. 6.7 a měrných emisí z Tab. 6.8 získáme množství vyprodukovaných emisí benzo(a)pyrenu za rok, které jsou uvedeny v Tab. 6.9.

typ konstrukce spalovacího zařízení	emise z bytů v rodinných domech			emise z bytů v bytových domech			celkem		
	uhlí		biomasa	uhlí		biomasa	uhlí		biomasa
	kg/rok						kg/rok		
ocelové kotle (převážně odhořívací)	HU	3 070	178	HU	269	12	HU	3 339	190
	CU	418		CU	37		CU	454	
litinové kotle (převážně prohořívací)	HU	1 691	1974	HU	148	139	HU	1 839	2 113
	CU	88		CU	8		CU	96	
automatické kotle na uhlí	HU	0,060	-	HU	0,005	-	HU	0,066	-
	CU	0,013		CU	0,001		CU	0,014	
automatické kotle na pelety	HU	-	1	HU	-	0,083	HU	-	1
	CU	-		CU	-		CU	-	
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	HU	-	74	HU	-	5	HU	-	79
	CU	-		CU	-		CU	-	
celkem hnědé uhlí	4 761		-	417		-	5 178		-
celkem černé uhlí	506		-	44		-	551		-
celkem	5 267		2 227	462		156	5 729		2 384

**Tab. 6.9:** Roční emise benzo(a)pyrenu

Z Tab. 6.9 je patrné, že v současnosti se ročně v ČR vyprodukuje z lokálních topenišť na tuhá paliva přibližně 8 113 kilogramů emisí benzo(a)pyrenu. Z toho 5 729 kilogramů pochází z uhlí a 2 384 kilogramů z biomasy.

Získaný výsledek lze porovnat s údajem v interaktivním datovém programu EEA. V něm je možné dohledat, že hodnota ročních emisí benzo(a)pyrenu vyprodukovaných v ČR z lokálních topenišť na tuhá paliva je 8 804 kilogramů (za poslední uvedený rok - 2013) [17].

Určitý rozdíl v porovnávaných hodnotách ročních emisí benzo(a)pyrenu je možné přisoudit tomu, že hodnota emisních faktorů EEA (Tab. 3.4) a ČHMÚ (Tab. 3.3) se částečně liší. Lze tedy prohlásit, že získaný výsledek s určitou odchylkou odráží skutečný stav.

## 6.2 Varianty možného dopadu kotlíkových dotací

Program **Kotlíkové dotace** předpokládá, že celkem dojde k výměně přibližně 100 tisíc starých kotlů. Dotace jsou určeny pro majitele (spolumajitele) rodinných domů, proto se v bytových domech nijak neprojeví. V následující části práce budou zpracovány 3 možné varianty výměny tohoto množství starých kotlů.

### Varianta 1

V této variantě se předpokládá, že i po výměně zůstane zachován stejný počet kotlů na tuhá paliva. Předpokládá se, že majitelé chtějí i nadále topit tuhými palivy a vymění pouze staré typy kotlů (prohořivací, odhořivací) za modernější (automatické, zplyňovací). Počty kotlů pro jednotlivé typy byly stanoveny tak, aby byl zachován jejich vzájemný poměr z Tab. 6.3. Pro lepší představu jsou uvedeny konkrétní údaje:

- Počet kotlů na tuhá paliva po výměně 627 793
- Ze 100 000 vyřazených kotlů bude 57 912 odhořivacích a 42 088 prohořivacích
- Automatické kotle na uhlí se zvýší o 61 380
- Automatické kotle na pelety se zvýší o 4 248
- Zplyňovací kotle na dřevo se zvýší o 34 372

### Varianta 2

V této variantě se předpokládá, že 25% majitelů přejde při výměně kotle z vytápění tuhými palivy na vytápění plynem. Celkový počet kotlů na tuhá paliva se po výměně sníží a nové kotle na plyn v bilanci emisí benzo(a)pyrenu vzniklých spalováním tuhých paliv nebudou figurovat. V této variantě se pracuje s předpokladem, že vyřazené kotle budou v poměru 2/3 prohořivací a 1/3 odhořivací. Dále se uvažuje, že 1/4 majitelů, kteří zůstanou u vytápění tuhými palivy, si pořídí kotel na dřevo a 3/4 kotel na uhlí. Pro lepší představu jsou uvedeny konkrétní údaje:

- Počet kotlů na tuhá paliva se po výměně sníží o 25 000, tedy na 602 793
- Ze 100 000 vyřazených kotlů bude 33 000 odhořivacích a 67 000 prohořivacích
- Automatické kotle na uhlí se zvýší o 56 250
- Automatické kotle na pelety se zvýší o 9 375
- Zplyňovací kotle na dřevo se zvýší o 9 375



### Varianta 3

V této variantě se předpokládá, že 35% majitelů přejde při výměně kotle z vytápění tuhými palivy na vytápění plynem. Celkový počet kotlů na tuhá paliva se po výměně sníží a nové kotle na plyn v bilanci emisí benzo(a)pyrenu vzniklých spalováním tuhých paliv nebudou figurovat. V této variantě se uvažuje, že všechny vyřazené kotle budou prohořivací. Dále se předpokládá, že 1/2 majitelů, kteří zůstanou u vytápění tuhými palivy, si pořídí kotel na dřevo a 1/2 kotel na uhlí. Pro lepší představu jsou uvedeny konkrétní údaje:

- Počet kotlů na tuhá paliva se po výměně sníží o 35 000, tedy na 592 793
- Všechny 100 000 vyřazených kotlů bude prohořivacích
- Automatické kotle na uhlí se zvýší o 32 500
- Automatické kotle na pelety se zvýší o 16 250
- Zplyňovací kotle na dřevo se zvýší o 16 250

V Tab. 6.10 jsou pro jednotlivé varianty promítnuty změny v počtech kotlů oproti současnosti.

typ konstrukce spalovacího zařízení	současnost	varianta 1	varianta 2	varianta 3
	ks	ks	ks	ks
ocelové kotle (převážně odhořivací)	310 207	252 295	277 207	310 207
litinové kotle (převážně prohořivací)	225 442	183 355	158 442	125 442
automatické kotle na uhlí	10 162	71 542	66 412	42 662
automatické kotle na pelety	8 932	13 181	18 307	25 182
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	73 050	107 421	82 425	89 300
<b>celkem</b>	<b>627 793</b>	<b>627 793</b>	<b>602 793</b>	<b>592 793</b>

**Tab. 6.10:** Změny v počtech kotlů pro uvažované varianty

Obdobně jako bilance současného stavu v kapitole 6.1 byly za využití metodiky vypočteny bilance emisí benzo(a)pyrenu pro jednotlivé varianty. Výsledná data jsou uvedena v Tab. 6.11.

typ konstrukce spalovacího zařízení		emise z bytů v rodinných domech			emise z bytů v bytových domech		
		HU	CU	biomasa	HU	CU	biomasa
		kg/rok					
varianta 1	ocelové kotle (převážně odhořívací)	2 417	329	140	269	37	12
	litinové kotle (převážně prohořívací)	1 337	70	1 561	148	8	139
	automatické kotle na uhlí	0,477	0,102	-	0,005	0,001	-
	automatické kotle na pelety	-	-	2	-	-	0,083
	speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	-	-	113	-	-	5
	<b>celkem</b>	<b>3 755</b>	<b>399</b>	<b>1 816</b>	<b>417</b>	<b>44</b>	<b>156</b>
varianta 2	ocelové kotle (převážně odhořívací)	2 698	367	156	269	37	12
	litinové kotle (převážně prohořívací)	1 128	59	1317	148	8	139
	automatické kotle na uhlí	0,442	0,094	-	0,005	0,001	-
	automatické kotle na pelety	-	-	3	-	-	0,083
	speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	-	-	85	-	-	5
	<b>celkem</b>	<b>3 826</b>	<b>426</b>	<b>1 560</b>	<b>417</b>	<b>44</b>	<b>156</b>
varianta 3	ocelové kotle (převážně odhořívací)	3 070	418	178	269	37	12
	litinové kotle (převážně prohořívací)	851	44	993	148	8	139
	automatické kotle na uhlí	0,281	0,060	-	0,005	0,001	-
	automatické kotle na pelety	-	-	4	-	-	0,083
	speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	-	-	92	-	-	5
	<b>celkem</b>	<b>3 921</b>	<b>462</b>	<b>1 267</b>	<b>417</b>	<b>44</b>	<b>156</b>

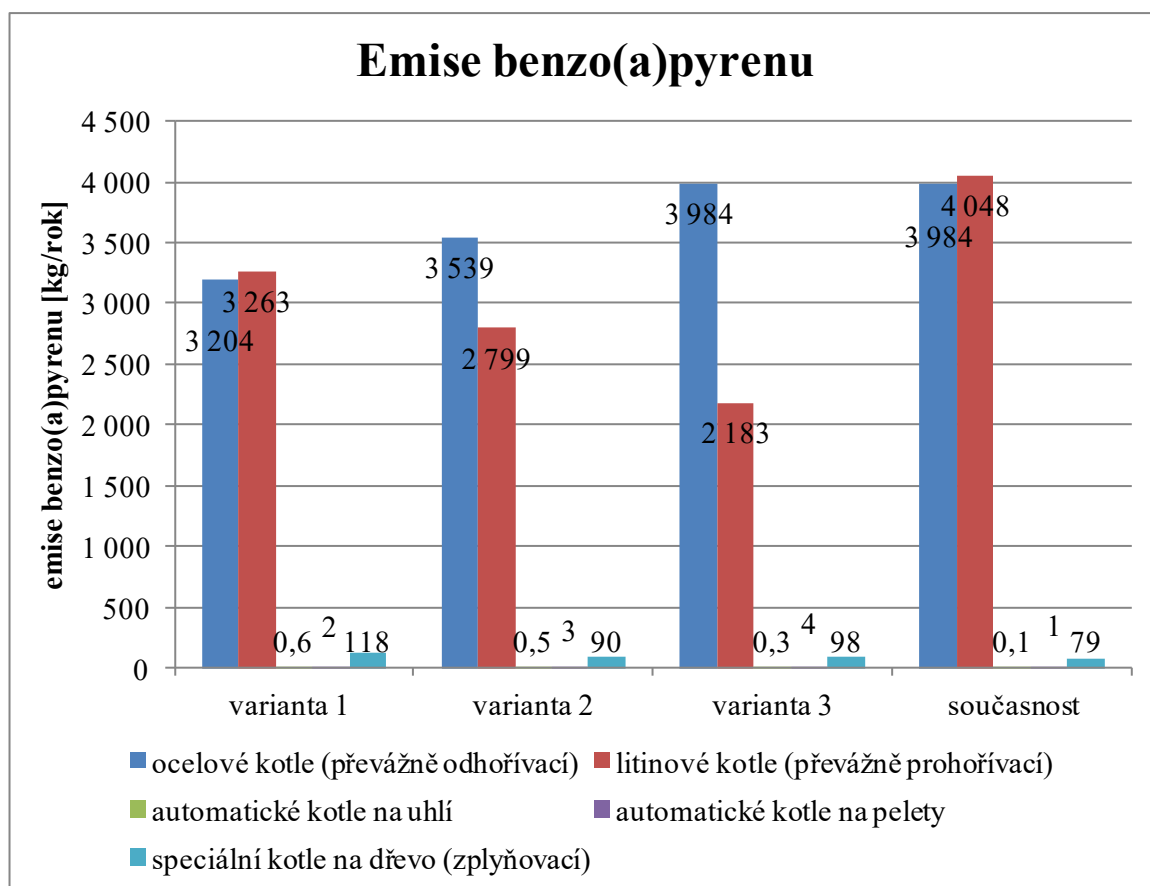
**Tab. 6.11:** Emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty

Z Tab. 6.11 bylo dále vypočteno celkové množství emisí benzo(a)pyrenu vzniklých spalováním tuhých paliv v jednotlivých typech spalovacího zařízení za rok. Údaje pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v Tab. 6.12.

typ konstrukce spalovacího zařízení	varianta 1	varianta 2	varianta 3	současnost
	kg/rok	kg/rok	kg/rok	kg/rok
ocelové kotle (převážně odhořivací)	3 204	3 539	3 984	3 984
litinové kotle (převážně prohořivací)	3 263	2 799	2 183	4 048
automatické kotle na uhlí	0,6	0,5	0,3	0,1
automatické kotle na pelety	2	3	4	1
speciální kotle na dřevo (zplyňovací)	118	90	98	79
<b>celkem</b>	<b>6 588</b>	<b>6 431</b>	<b>6 268</b>	<b>8 113</b>

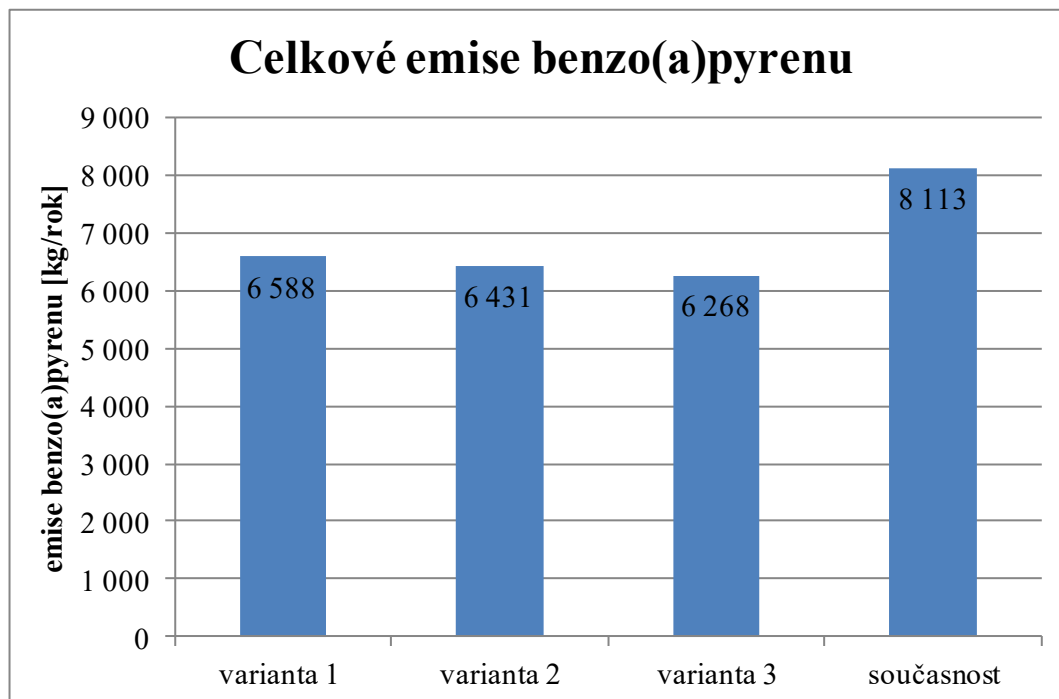
**Tab. 6.12:** Celkové emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty

Pro lepší názornost jsou údaje z Tab. 6.12 vyobrazeny v grafu na Obr. 6.1.



**Obr. 6.1:** Emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty

V grafu na Obr. 6.2 jsou znázorněny možné dopady Kotlíkových dotací na množství vyprodukovaných emisí benzo(a)pyrenu pro jednotlivé uvažované varianty oproti současnosti.



**Obr. 6.2:** Celkové emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty

Při porovnání zvažovaných variant v grafu na Obr. 6.2 by se mohlo jevit, že mezi nimi není výrazný rozdíl. Uvážíme-li však, že rozdíl mezi první a třetí variantou představuje přibližně 300 kilogramů emisí benzo(a)pyrenu ročně, které by kotle na tuhá paliva nevyprodukovala, jedná se z hlediska vlivu na životní prostředí o nezanedbatelný rozdíl.

V porovnání se současným stavem by realizace kterékoli ze tří zvažovaných variant představovala snížení emisí benzo(a)pyrenu vzniklých spalováním tuhých paliv v lokálních topeništích zhruba o 1/5. To by představovalo 1525 až 1845 kilogramů emisí benzo(a)pyrenu, které by nadále nezatěžovaly životní prostředí. Jednalo by se o výrazné snížení množství těchto vysoce toxických látek vypouštěných do ovzduší.

Z výsledků zpracování tří variant možných dopadů Kotlíkových dotací vyplývá, že tento program má smysl. Výměnou stávajících nevyhovujících kotlů na pevná paliva za nové nízkoemisní zdroje by mělo dojít k výraznému snížení emisí z lokálních topenišť a tedy ke splnění základního cíle, který si program Kotlíkové dotace vytyčil.

## 7 Závěr

Na spalovací procesy při vytápění domácností má vliv mnoho různorodých a proměnlivých faktorů. Těmi zásadními jsou **typ spalovacího zařízení, druh paliva a způsob provozu kotle**.

Po celé ČR je podle předpokladů provozováno zhruba 630 tisíc spalovacích zařízení na tuhá paliva. Jsou různého stáří a různé konstrukce a jejich rozvrstvení se v jednotlivých regionech liší.

Stejný druh paliva může mít různé složení a vlhkost, například podle místa vytěžení u uhlí nebo podle výrobce u pelet a biomasy.

Mnozí uživatelé neprovozují kotel na jmenovitý výkon, ale na snížený. Někteří uživatelé využívají kombinovaný způsob vytápění. Rovněž záleží na chování obsluhy kotle. Jestli nepoužívá nevhodná paliva včetně domovního odpadu nebo oheň příliš nedusí.

Z výše uvedených důvodů vyplývá, že přesné stanovení emisních faktorů a výpočet měrných emisí je **velmi komplikovaná záležitost**. Je vhodné emisní faktory **pravidelně aktualizovat** v souladu s tím, jak se postupně daří jednotlivé skutečnosti ovlivňující spalovací procesy blíže prozkoumat, popsat a do emisních faktorů zapracovat.

Na základě provedených experimentálních měření při spalování černého uhlí v různých konstrukcích kotlů byly stanoveny měrné emise PAU včetně benzo(a)pyrenu pro prohořivací, odhořivací, zplyňovací a automatické kotle. Na každém typu kotle byly provedeny 3 spalovací zkoušky při jmenovitém výkonu kotlů. Jako palivo bylo použito polské černé uhlí. Z výsledků měření je patrné, že nejvíce emisí PAU vzniká při spalování v prohořivacím kotli, nejméně pak v automatickém. Rozdíl činí až několik řádů. V porovnání s automatickým kotlem vyprodukuje zplyňovací kotel zhruba 10 krát více emisí PAU, odhořivací kotel přibližně 150 krát více emisí PAU a prohořivací kotel dokonce 1000 krát více emisí PAU. **Rozdíl ve vyprodukovaných emisích PAU u prohořivacího kotle a ostatních typů kotlů je tedy markantní.**

Obdobná situace nastává i při porovnání kotlů z hlediska toxicity PAU ve spalinách. **Prohořivací kotle vykazují mnohem vyšší toxický ekvivalent směsi oproti ostatním typům kotlů**, který je způsoben vysokým obsahem benzo(a)pyrenu v jeho spalinách. Provozování prohořivacího kotle na černé uhlí je téměř 4000 krát toxičtější než provozování automatického kotle na černé uhlí. Toxicity, které dosáhne prohořivací kotel za jednu hodinu provozu, dosáhne odhořivací kotel za 9 hodin provozu, zplyňovací kotel za 189 hodin provozu (zhruba 8 dnů) a automatický dokonce za 3 702 hodin provozu (zhruba 5 měsíců).

V práci byly rovněž zpracovány tři varianty možných dopadů **Kotlíkových dotací**. Program Kotlíkové dotace předpokládá, že celkem dojde k výměně přibližně 100 tisíc starých kotlů. V **první variantě** se předpokládalo, že i po výměně zůstane zachován stejný počet kotlů na tuhá paliva a že majitelé pouze vymění staré typy kotlů za modernější. **Druhá varianta** předpokládala, že 25% majitelů přejde při výměně kotle z vytápění tuhými palivy na vytápění plynem a že z vyřazených kotlů budou 2/3 prohořivací a 1/3 odhořivací. **Třetí varianta** předpokládala, že 35% majitelů přejde při výměně kotle z vytápění tuhými palivy na vytápění plynem a že všechny vyřazené kotle budou prohořivací.

V porovnání se současným stavem by realizace kterékoli ze tří zvažovaných variant představovala **snížení emisí benzo(a)pyrenu** vzniklých spalováním tuhých paliv v lokálních topeništích **zhruba o 1/5**. To by představovalo 1525 až 1845 kilogramů emisí benzo(a)pyrenu, které by nadále nezatěžovaly životní prostředí. Jednalo by se o výrazné snížení množství těchto karcinogenních látek vypouštěných do ovzduší.

Z výsledků zpracování tří variant možných dopadů Kotlíkových dotací vyplývá, že tento program má smysl. Výměnou stávajících nevyhovujících kotlů na pevná paliva za nové nízkoemisní zdroje by mělo dojít k výraznému snížení emisí z lokálních topenišť a tedy ke splnění základního cíle, který si program Kotlíkové dotace vytyčil.

## 8 Seznam zdrojů

- [1] Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU). *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 28. října 2015]. Dostupné z: <<http://www.irz.cz/node/86>>.
- [2] Polyaromatické uhlovodíky. *Wikipedia* [online]. 2015 [cit. 13. listopadu 2015]. Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyaromatické\\_uhlovodíky](https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyaromatické_uhlovodíky)>.
- [3] Polycyklické aromatické uhlovodíky. *Vítejte na Zemi* [online]. [cit. 17. listopadu 2015]. Dostupné z: <<http://www.vitejtenazemi.cz/vzduch/index.php?article=137>>.
- [4] Polyaromatické uhlovodíky. *Region, Učebnice SŠ* [online]. [cit. 28. října 2015]. Dostupné z: <<http://ucebnice3.enviregion.cz/ovzdusi/znecistujici-latky/polyaromaticke-uhlovodiky>>.
- [5] Benzo(a)pyren. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2014 [cit. 22. Listopadu 2015]. Dostupné z: <[http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/IV2\\_BaP\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/IV2_BaP_CZ.html)>.
- [6] Evaluating the Toxicity and Assessing the Carcinogenic Risk of Environmental Mixtures Using Toxicity Equivalency Factors. *Washington State Department of Ecology* [online]. [cit. 5. května 2016]. Dostupné z: <<https://fortress.wa.gov/ecy/clarc/FocusSheets/tef.pdf>>.
- [7] HORÁK, Jiří; KOLEKTIV AUTORŮ. Stanovení emisních faktorů pro spalování tuhých paliv ve spalovacích zařízeních provozovaných v domácnostech. *Topenářství instalace* [online]. 2009 [cit. 28. října 2015]. Dostupné z: <<http://vec.vsb.cz/userfiles/Stanoveni%20EF%20pro%20TP.pdf>>.
- [8] Emisní databáze – Registr emisí a stacionárních zdrojů (REZZO). *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 4. Května 2016]. Dostupné z: <[http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/metodiky\\_eb.pdf](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/metodiky_eb.pdf)>
- [9] HORÁK, Jiří; HOPAN, František. Metodika stanovení „váhy“ typu paliva a typu spalovacího zařízení pro výpočet emisních faktorů znečišťujících látek měrných emisí znečišťujících látek. *Zpráva č.77/13* [online]. 2013 [cit. 18. října 2015]. Dostupné z: <<http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/MetodikaStanoveniVahy.pdf>>.
- [10] LEINERT, Ondřej. Ministerstvo prověří výrobce kotlů. Lidé se prý bát nemusí. *MF Dnes*. 27.1.2016, s. 3

- [11] HORÁK, Jiří; HOPAN, František; ŠYC, Michal; MACHÁLEK, Pavel; KRPEC, Kamil; OCELKA, Tomáš; TOMŠEJ, Tomáš. Balance emisí znečišťujících látek z malých zdrojů znečišťování se zaměřením na spalování tuhých paliv. *Chemické listy* [online]. 2011, č.11 [cit. 28. října 2015]. Dostupné z: <[http://chemicke-listy.cz/docs/full/2011\\_11\\_851-855.pdf](http://chemicke-listy.cz/docs/full/2011_11_851-855.pdf)>
- [12] HOPAN, František; HORÁK, Jiří. Vypočet emisních faktorů znečišťujících látek pro léta 2001 až 2012 a tři varianty pro rok 2022 na základě experimentálních a statistických dat. *Zpráva č.34/14* [online]. 2014 [cit. 18. října 2015]. Dostupné z: <<http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/VypocetEF.pdf>>
- [13] Small combustion. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013* [online]. [cit. 3. ledna 2016]. Dostupné z: <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>>.
- [14] ČSN EN 1948-1 (83 4745). *Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace PCDD/PCDF a dioxynům podobných PCB - Část 1: Vzorkování PCDD/PCDF*. 2006.
- [15] HOPAN, František; KRPEC, Kamil; KREMER, Jiří. Emisní faktory prachu a B(a)P z polských lokálních topenišť. *Zpráva č.88/15*. Ostrava: Výzkumné energetické centrum, 2015. 38 s
- [16] DLPI. *Dekati* [online]. [cit. 31. října 2015]. Dostupné z: <<http://www.dekati.com/products/Fine%20Particle%20Measurement/DLPI>>.
- [17] Air pollutant emissions data viewer. *EEA* [online]. [cit. 5. května 2016]. Dostupné z: <<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap>>.
- [18] Databáze VEC. *Výzkumné energetické centrum. VŠB-TU Ostrava*, 2015.



## 9 Seznam tabulek

<b>Tab. 2.1:</b> Toxický ekvivalentní faktor.....	9
<b>Tab. 3.1:</b> Porovnání emisních faktorů sumy 4 PAU z roku 2011 .....	13
<b>Tab. 3.2:</b> Vliv spalovacího zařízení na měrné emise sumy 4 PAU.....	14
<b>Tab. 3.3:</b> Emisní faktory ČHMÚ .....	14
<b>Tab. 3.4:</b> Emisní faktory EEA.....	15
<b>Tab. 5.1:</b> Rozbor použitých paliv.....	19
<b>Tab. 5.2:</b> Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Viadrus Hercules U26 ....	23
<b>Tab. 5.3:</b> Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Dakon DOR32.....	25
<b>Tab. 5.4:</b> Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Benekov – Ling 25 .....	27
<b>Tab. 5.5:</b> Naměřené a vypočtené hodnoty měrných emisí kotle Atmos kombi AC25S ....	29
<b>Tab. 5.6:</b> Průměrná hodnota měrných emisí (zkoušky 1,2,3) .....	30
<b>Tab. 5.7:</b> Průměrná hodnota měrných emisí (zkoušky 2,3) .....	32
<b>Tab. 5.8:</b> Odhořívací kotel – navážky na patrech impaktoru.....	38
<b>Tab. 5.9:</b> Automatický kotel – navážky na patrech impaktoru .....	39
<b>Tab. 5.10:</b> Zplyňovací kotel – navážky na patrech impaktoru.....	39
<b>Tab. 6.1:</b> Počty domácností vytápěných tuhými palivy .....	41
<b>Tab. 6.2:</b> Odhad podílu typu zařízení na spotřebě daného paliva .....	42
<b>Tab. 6.3:</b> Odhad počtu domácností podle typu kotle a typu domácnosti .....	42
<b>Tab. 6.4:</b> Roční spotřeba paliv průměrných domácností a účinnost spalovacích zařízení..	43
<b>Tab. 6.5:</b> Roční spotřeba uhlí a biomasy.....	43
<b>Tab. 6.6:</b> Procentuální zastoupení uhlí.....	44
<b>Tab. 6.7:</b> Roční spotřeba biomasy, hnědého a černého uhlí .....	45
<b>Tab. 6.8:</b> Měrné emise benzo(a)pyrenu .....	45
<b>Tab. 6.9:</b> Roční emise benzo(a)pyrenu .....	46
<b>Tab. 6.10:</b> Změny v počtech kotlů pro uvažované varianty.....	48
<b>Tab. 6.11:</b> Emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty.....	49
<b>Tab. 6.12:</b> Celkové emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty .....	50

## 10 Seznam obrázků

<b>Obr. 2.1:</b> Průměrný podíl významných sektorů na emisích PAU.....	3
<b>Obr. 2.2:</b> Struktura molekuly .....	4
<b>Obr. 2.3:</b> Roční průměrná koncentrace benzo(a)pyrenu v roce 2014.....	5
<b>Obr. 2.4:</b> Emisní hustoty benzo(a)pyrenu ze čtverců 5x5 km v roce 2013 .....	5
<b>Obr. 2.5:</b> Trendy ročních charakteristik benzo(a)pyrenu v ČR .....	6
<b>Obr. 2.6:</b> Podíl jednotlivých sektorů na celkových emisích benzo(a)pyrenu v roce 2013.....	7
<b>Obr. 2.7:</b> Roční chod průměrných měsíčních koncentrací benzo(a)pyrenu .....	8
<b>Obr. 4.1:</b> Schematický náčrt vzorkovacího systému pro filtračně-kondenzační metodu ...	16
<b>Obr. 4.2:</b> Schematický náčrt vzorkovacího systému pro zředňovací metodu .....	17
<b>Obr. 4.3:</b> Schematický náčrt vzorkovacího systému s chlazenou sondou .....	18
<b>Obr. 5.1:</b> Schéma odběrových míst a ředícího tunelu.....	20
<b>Obr. 5.2:</b> Odběrová aparatura PAU .....	21
<b>Obr. 5.3:</b> Schéma prohřívacího kotle <b>Obr. 5.4:</b> kotel Viadrus Hercules U26 .....	22
<b>Obr. 5.5:</b> Schéma odhořívacího kotle <b>Obr. 5.6:</b> kotel Dakon DOR 32 .....	24
<b>Obr. 5.7:</b> Schéma automatického kotle <b>Obr. 5.8:</b> kotel Benekov – Ling 25 .....	26
<b>Obr. 5.9:</b> Schéma zplyňovacího kotle <b>Obr. 5.10:</b> kotel Atmos kombi AC25S .....	28
<b>Obr. 5.11:</b> Procentuální zastoupení PAU (zkoušky 1,2,3).....	30
<b>Obr. 5.12:</b> Suma 4 PAU a její toxicita (zkoušky 1,2,3) .....	31
<b>Obr. 5.13:</b> Procentuální zastoupení PAU (zkoušky 2,3).....	32
<b>Obr. 5.14:</b> Suma 4 PAU a její toxicita (zkoušky 2,3) .....	33
<b>Obr. 5.15:</b> Suma 4 PAU pro stejnou toxicitu.....	34
<b>Obr. 5.16:</b> Toxicita pro stejnou sumu 4 PAU .....	34
<b>Obr. 5.17:</b> Počet hodin k dosažení stejné toxicity .....	35
<b>Obr. 5.18:</b> Separátor částic - Impaktor.....	36
<b>Obr. 5.19:</b> Princip fungování impaktoru.....	37
<b>Obr. 5.20:</b> Procentuální zastoupení velikostí částic .....	40
<b>Obr. 6.1:</b> Emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty .....	50
<b>Obr. 6.2:</b> Celkové emise benzo(a)pyrenu pro uvažované varianty.....	51

## 11 Seznam výkresových příloh

*č.dokumentu      druh dokumentu - název*

001	Konstrukční výkres - Sestava impaktoru
001K	Kusovník – Kusovník impaktoru
1	Výrobní výkres - Tenká podložka
2	Výrobní výkres - Podložka
3	Výrobní výkres - Držák fólie
4	Výrobní výkres - 13. patro
5	Výrobní výkres - Těsnění
6	Výrobní výkres - Nátrubek
7	Výrobní výkres - Plášť
8	Výrobní výkres - Čelo impaktoru
9	Výrobní výkres - Nulté patro